



TESIS - TK 142541

**ABSORPSI DAN DESORPSI GAS CO<sub>2</sub> SECARA SIMULTAN  
MENGUNAKAN KONTAKTOR MEMBRAN *HOLLOW FIBER*  
POLIPROPILENA DENGAN VARIASI PELARUT AMIN  
TERAKTIVASI**

NIDIA INTAN LISTIYANA  
NRP 02211650010011

DOSEN PEMBIMBING  
Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D  
Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNOLOGI PROSES  
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018



THESIS - TK 142541

**ABSORPSI DAN DESORPSI GAS CO<sub>2</sub> SECARA SIMULTAN  
MENGUNAKAN KONTAKTOR MEMBRAN *HOLLOW  
FIBER* POLIPROPILENA DENGAN VARIASI PELARUT  
AMIN TERAKTIVASI**

**NIDIA INTAN LISTIYANA  
NRP. 02211650010011**

**DOSEN PEMBIMBING**

**Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D.  
NIP. 1984 05 08 2009 12 2004**

**Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.  
NIP. 1976 1020 2005 01 2001**

**PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNOLOGI PROSES  
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
LABORATORIUM PERPINDAHAN MASSA DAN PANAS  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018**



**THESIS - TK 142541**

**SIMULTANEOUSLY CO<sub>2</sub> ABSORPTION AND  
DESORPTION BY USING POLYPROPYLENE HOLLOW  
FIBER MEMBRANE CONTACTOR WITH UTILIZING  
VARIETY OF ACTIVATED AMINE SOLVENTS**

**NIDIA INTAN LISTIYANA  
NRP. 02211650010011**

**SUPERVISOR**

**Siti Nurkhamidah, S.T.,M.S.,Ph.D.  
NIP. 1984 05 08 2009 12 2004**

**Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.  
NIP. 1976 1020 2005 01 2001**

**MAGISTER PROGRAM  
PROCESS OF TECHNOLOGY  
CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
HEAT AND MASS TRANSFER LABORATORY  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018**

# LEMBAR PENGESAHAN TESIS

## ABSORPSI DAN DESORPSI GAS CO<sub>2</sub> SECARA SIMULTAN MENGUNAKAN KONTAKTOR MEMBRAN *HOLLOW FIBER* POLIPROPILENA DENGAN VARIASI PELARUT AMIN TERAKTIVASI

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (MT)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Nidia Intan Listiyana

NRP. 02211650010011

Tanggal Ujian : 10 Juli 2018

Periode Wisuda : September 2018

Disetujui oleh :

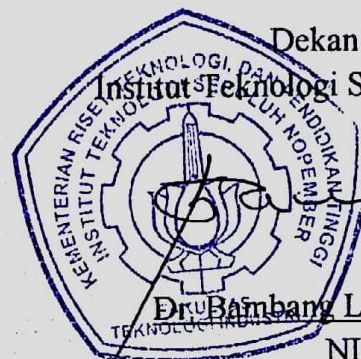
- |  |               |
|--|---------------|
| 1. Siti Nurkhamidah, ST., MS., PhD<br>NIP. 1984 05 08 2009 12 2004 | Pembimbing I  |
| 2. Dr. Yeni Rahmawati, ST., MT<br>NIP. 1976 10 20 2005 01 2001     | Pembimbing II |
| 3. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, MS<br>NIP. 1951 08 04 1974 12 1001    | Penguji I     |
| 4. Prof. Dr. Ir. Kuswandi, DEA<br>NIP. 1958 06 12 1984 03 1003     | Penguji II    |
| 5. Juwari, ST., M.Eng., PhD<br>NIP. 1973 06 15 1999 03 1003        | Penguji III   |

.....

.....

.....

.....



Dekan Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

.....  
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, ST., MT  
NIP. 1969 05 07 1995 12 1001

# **ABSORPSI DAN DESORPSI GAS CO<sub>2</sub> SECARA SIMULTAN MENGUNAKAN KONTAKTOR MEMBRAN *HOLLOW FIBER* POLIPROPILENA DENGAN VARIASI PELARUT AMIN TERAKTIVASI**

**Nama Mahasiswa** : Nidia Intan Listiyana  
**NRP** : 02211650010011  
**Dosen Pembimbing I** : Siti Nurkhamidah, ST., MS., Ph.D.  
**Dosen Pembimbing II** : Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.

## **ABSTRAK**

Dalam proses pengolahan gas alam, komponen pengotor seperti CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, dan uap air harus dipisahkan karena dapat mempengaruhi kualitas dan proses pengolahan gas alam lebih lanjut. Teknologi kontaktor membran merupakan perkembangan pemisahan CO<sub>2</sub> yang menggabungkan proses absorpsi gas dengan pelarut dan teknologi membran. Kelebihan teknologi kontaktor membran dibandingkan dengan teknologi konvensional adalah memiliki luas kontak gas-liquid yang lebih besar, ukuran alat yang lebih kecil, bersifat modular, dan laju alir gas dan liquid dapat diatur secara independen sehingga dapat mengatasi masalah operasional. Pada penelitian ini digunakan kontaktor polipropilena (PP) *hollow fiber* yang terpisah untuk absorpsi dan desorpsi. Absorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub> dilakukan menggunakan pelarut amin teraktivasi yang bertujuan untuk mengetahui pelarut yang efektif dan pengaruh aktivator dalam pelarut. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui koefisien perpindahan massa CO<sub>2</sub> pada proses desorpsi dan mempelajari pengaruh parameter operasi terhadap performansi absorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub>. Pada proses absorpsi, gas yang mengandung CO<sub>2</sub> dialirkan ke bagian *shell* pada P = 1,5 bar dan T = 31°C (atmosferik) dan pelarut pada P = 1,5 bar dan T = 31°C (atmosferik) dialirkan ke bagian *tube* membran. Sedangkan untuk proses desorpsi, pelarut yang kaya CO<sub>2</sub> keluar absorber dipanaskan hingga T = 70°C sebelum masuk ke dalam desorber. Proses desorpsi untuk melepaskan CO<sub>2</sub> dari pelarut dilakukan dengan metode vakum dengan P<sub>vakum</sub> = 0,2 bar (gauge) pada bagian *shell*. Pada penelitian ini, pelarut amin yang digunakan adalah diethanolamina (DEA) dan methyl diethanolamina (MDEA) dengan variasi

penambahan aktivator, yaitu piperazine (PZ), arginin, dan mono sodium glutamate (MSG). Parameter operasi yang divariasikan untuk mendapatkan koefisien perpindahan massa total dari eksperimen adalah laju alir pelarut, yaitu 100-500 mL/menit. Analisa konsentrasi gas CO<sub>2</sub> di dalam gas dan liquid menggunakan metode titrasi *chittic*. Dari hasil percobaan, pelarut dengan penambahan aktivator lebih baik dibandingkan pelarut tanpa aktivator. DEA-PZ memberikan hasil terbaik untuk proses absorpsi dan desorpsi. Fluks absorpsi DEA-PZ adalah  $3,2488 \times 10^{-4}$  mol/m<sup>2</sup>s dengan CO<sub>2</sub> *removal* sebesar 93,574%, kemudian nilai fluks desorpsi adalah  $6,8631 \times 10^{-3}$  mol/m<sup>2</sup>s dan efisiensi desorpsi sebesar 81,101%. Dari ketiga jenis aktivator yang digunakan, aktivator PZ memberikan nilai fluks dan efisiensi paling tinggi. Persamaan Wilson Plot untuk menentukan koefisien perpindahan massa CO<sub>2</sub> pada proses desorpsi menggunakan pelarut DEA tanpa aktivator adalah  $1/K_{OL} = 27,162(1/Re^{0,8}) + 17,533$  sedangkan untuk DEA-PZ adalah  $1/K_{OL} = 11,389(1/Re^{0,8}) + 20,076$ . Sedangkan untuk pelarut MDEA tanpa aktivator adalah  $1/K_{OL} = 112,28(1/Re^{0,8}) + 143,88$  dan untuk MDEA-PZ adalah  $1/K_{OL} = 90,419(1/Re^{0,8}) + 20,486$ . Pada uji kinerja kontaktor membran selama 240 menit, nilai fluks dan %CO<sub>2</sub> *removal* terus menurun seiring bertambahnya waktu operasi hingga 75 menit pertama dan setelah itu menunjukkan nilai yang konstan sampai menit ke-240. %CO<sub>2</sub> *removal* pada proses absorpsi dan desorpsi secara simultan adalah 82,191%.

**Kata kunci:** absorpsi, desorpsi, kontaktor membran, aktivator, pemisahan CO<sub>2</sub>

# **Simultaneously CO<sub>2</sub> Absorption and Desorption by Using Polypropylene Hollow Fiber Membrane Contactor with Utilizing Variety of Activated Amine Solvents**

**Student Name** : Nidia Intan Listiyana  
**Student Identity Number** : 02211650010011  
**Supervisor I** : Siti Nurkhamidah, ST., MS., Ph.D.  
**Supervisor II** : Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.

## **ABSTRACT**

In natural gas processing processes where the main component is a hydrocarbon must be separated from impurity components such as CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, and water vapor as they may affect the quality and processing of natural gas further. Contactor membrane technology is an improvement of CO<sub>2</sub> removal technology combining gas absorption process with solvent and membrane technology in order to set the pattern of flow rate for avoiding flooding, loading, foaming, and entrainment that usually occurs in conventional absorption technology. The advantages of membrane contactors compared to conventional absorption technology are high surface area per unit contactor volume, independent control of gas and liquid flow rates without any operational problems, small size device, known gas-liquid interfacial area, modular and being easy to scale up or down. In this work, arginine, piperazine (PZ), and mono sodium glutamate (MSG) as activators were added into diethanolamine (DEA) and methyl diethanolamine (MDEA) solution to form aqueous solutions of activated DEA and activated MDEA. Polypropylene hollow fiber membrane contactor was used to absorption and desorption process in separately and simultaneously. CO<sub>2</sub> absorption and desorption were performed using an activated amine solvent which aims to determine the most effective solvent and activator effect in the solvent. This study also aims to determine the CO<sub>2</sub> mass transfer coefficient in the desorption process and the effect of operation parameters on the performance of CO<sub>2</sub> absorption-desorption. In absorption process, feed gas with CO<sub>2</sub> 40% volume and 60% volume N<sub>2</sub> balance flowed into shell side of membrane modul at P = 1,5 barg and T = 31 °C.

Then solvent flowed from the bottom of membrane module into tube side at  $P = 1,5$  barg and  $T = 31^{\circ}\text{C}$ . While desorption process, the  $\text{CO}_2$ -rich solvent from absorber was heated to  $T = 70^{\circ}\text{C}$  before entering into the desorber. After heating,  $\text{CO}_2$ -rich solvent continuously pumped into tube side of the hollow fiber membrane contactor. During desorption process, shell side of the module membrane contactor was kept at 0,2 barg by vacuum pump. Range of flow rate that used in this work was 100 – 500 mL/min. Analysis of  $\text{CO}_2$  concentration in gas and liquid were obtained by chittic titration method. The experimental results showed that the addition of activator could enhance the flux and efficiency of absorption and desorption. DEA-PZ give the best result for both absorption and desorption process. The highest value of absorption flux of DEA-PZ was  $3,2488 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2\text{s}$ , while  $\text{CO}_2$  removal was 93,574%. Then, the highest value of desorption flux of DEA-PZ was  $6,8631 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^2\text{s}$  and desorption efficiency was 81,101%. From the three types of activators used, PZ provide the highest value of flux and efficiency. The Wilson Plot equation for the  $\text{CO}_2$  mass transfer coefficient in the desorption process using the DEA solvent without activator was  $1/K_{OL} = 27,162(1/\text{Re}^{0,8}) + 17,533$ . While for DEA-PZ was  $1/K_{OL} = 11,389(1/\text{Re}^{0,8}) + 20,076$ . Then, Wilson Plot equation for the MDEA solvent without activator was  $1/K_{OL} = 112,28(1/\text{Re}^{0,8}) + 143,88$ . While for MDEA-PZ was  $1/K_{OL} = 90,419(1/\text{Re}^{0,8}) + 20,486$ . In a membrane contactor performance test for 240 minutes, the flux and  $\text{CO}_2$  removal values decrease continuously with increasing operating time up to the first 75 minutes then showed a constant value up to 240 minutes. % $\text{CO}_2$  removal in the process of absorption and desorption simultaneously is 82.191%.

**Key words :** absorption, desorption, membrane contactor, activator,  $\text{CO}_2$  removal



## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT karena atas berkah, rahmat-Nya saya dapat menyelesaikan Laporan Tesis yang berjudul, **“Absorpsi dan Desorpsi Gas CO<sub>2</sub> secara Simultan Menggunakan Kontaktor Membran Hollow Fiber Polipropilena dengan Variasi Pelarut Amin Teraktivasi”**. Tugas ini merupakan salah satu prasyarat meraih gelar master di Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (FTI-ITS). Selama penyusunan Laporan Tesis ini, saya banyak mendapat bimbingan, bantuan dan dorongan dari berbagai pihak. Untuk itu saya ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Juwari, ST, M.Eng selaku Ketua Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
2. Bapak Dr. Tantular Nurtono, ST., M.Eng selaku Ketua Prodi Studi Pascasarjana Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc, selaku Kepala Laboratorium Proses Perpindahan Panas dan Massa yang telah memberikan waktu, tenaga dan ilmu dalam penyelesaian proposal tesis ini.
4. Ibu Siti Nurkhamidah, ST., MS., Ph.D dan Ibu Dr. Yeni Rahmawati, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing saya atas bimbingan dan saran yang telah diberikan.
5. Bapak Dr. Ir. Susianto, DEA dan Bapak Fadlilatul Taufany, S.T., Ph.D selaku dosen Laboratorium Proses Perpindahan Panas dan Massa.
6. Bapak dan Ibu Dosen Pengajar serta seluruh tenaga pendidik Departemen Kimia FTI-ITS Surabaya.
7. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) atas bantuan dana penelitian yang diberikan kepada saya melalui jalur beasiswa tesis dalam negeri No : PRJ-1651 / LPDP.3/2017.
8. Orang tua serta saudara-saudara saya atas doa, dukungan dan bimbingan, perhatian dan kasih sayang yang selalu tercurah selama ini.

9. Teman-teman seangkatan pascasarjana (Dwila, Nur Anggita, Yosita, Dita, Icha, Mbak Via, Mbak Tika, Mas Jadid, Mas Irwan, Mbak Ijo, dkk.).
10. Teman-teman K-52 atas dukungan yang diberikan.
11. Serta teman-teman di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa (Wahyu, Bambang, Fikri, Gilang, Yosi, Fina, Yangki, Ika, Novira, Novita, Lilia, Aziz, Izhar, dkk.).

Saya menyadari bahwa penulisan laporan ini masih banyak kekurangan oleh karena itu saya sangat mengharapkan saran dan masukan yang konstruktif untuk kesempurnaan laporan ini.

Surabaya, 10 Juli 2018

Penyusun

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
ABSTRAK .....	iii
ABSTRACT .....	v
KATA PENGANTAR .....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	5
1.3. Batasan Masalah .....	6
1.4. Tujuan Penelitian .....	6
1.5. Manfaat Penelitian .....	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Karbondioksida (CO <sub>2</sub> ) .....	7
2.2. Kontaktor Membran Serat Berongga .....	8
2.2.1 Mekanisme Absorpsi – Desorpsi dalam Modul Kontaktor Membran .....	9
2.2.2 Model Aliran dalam Modul Kontaktor Membran .....	13
2.3. Koefisien Perpindahan Massa .....	14
2.4. Hambatan Perpindahan Massa Membran .....	17
2.5. Parameter Operasi pada Kontaktor Membran .....	19
2.6. Karakteristik Membran .....	21
2.7. Fenomena Pembasahan .....	23
2.8. Pemilihan Pelarut Alkanolamina .....	26
2.9. Aktivator Pelarut Absorpsi – Desorpsi CO <sub>2</sub> .....	30
2.10. Posisi Penelitian .....	33

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Garis Besar Penelitian .....	37
3.2. Bahan yang Digunakan.....	37
3.3. Variabel Penelitian .....	38
3.3.1 Kondisi yang Ditetapkan.....	38
3.3.2 Variabel Masukan .....	38
3.3.3 Variabel Respon .....	39
3.4. Rangkaian Alat Penelitian .....	39
3.5. Prosedur Penelitian .....	42
3.5.1 Absorpsi .....	42
3.5.2 Desorpsi.....	43
3.5.3 Absorpsi – Desorpsi Simultan.....	44
3.6. Analisa Hasil Penelitian.....	45
3.6.1 Analisa Fluks dan Efisiensi Absorpsi – Desorpsi CO <sub>2</sub> ....	45
3.6.2 Titrasi <i>Chittic</i> .....	46
3.6.3 Menghitung Koefisien Perpindahan Massa.....	47
3.6.3.1 Perhitungan Data Eksperimen .....	47
3.6.3.2 Perhitungan Empiris .....	50

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Absorpsi.....	53
4.1.1 Pengaruh Laju Alir Pelarut terhadap Fluks Absorpsi.....	54
4.1.2 Pengaruh Laju Alir Pelarut terhadap CO <sub>2</sub> <i>removal</i> absorpsi.....	56
4.1.3 Pengaruh Jenis Pelarut dan Penambahan Aktivator pada Proses Absorpsi .....	58
4.2 Desorpsi .....	62
4.2.1 Pengaruh Laju Alir Pelarut terhadap Fluks Desorpsi .....	62
4.2.2 Pengaruh Laju Alir Pelarut terhadap Efisiensi Desorpsi ...	65
4.2.3 Pengaruh Jenis Pelarut dan Penambahan Aktivator pada Proses Desorpsi .....	66
4.3 Koefisien Perpindahan Massa Desorpsi dari Data Eksperimen...	67
4.4 Uji Kinerja Kontaktor Membran secara Simultan .....	74

## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan..... 79

5.2 Saran.....80

DAFTAR PUSTAKA .....xix

DAFTAR NOTASI .....xxiii

LUARAN .....xxv

LAMPIRAN A Kalibrasi Peralatan dan Contoh Perhitungan

LAMPIRAN B Data Hasil Penelitian dan Perhitungan

LAMPIRAN C Gambar Peralatan Penelitian

RIWAYAT HIDUP PENULIS

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Proses pemisahan CO <sub>2</sub> menggunakan kontaktor membran .....	10
Gambar 2.2	Perpindahan massa CO <sub>2</sub> dari fase gas ke cair pada kontaktor membran.....	11
Gambar 2.3	Proses pelepasan CO <sub>2</sub> dari pelarut menggunakan kontaktor membran.....	12
Gambar 2.4	Perpindahan massa CO <sub>2</sub> dari fase cair ke gas pada kontaktor membran.....	12
Gambar 2.5	Pola aliran pada kontaktor membran.....	14
Gambar 2.6	Struktur polipropilena (PP) .....	23
Gambar 2.7	Sudut kontak dan pembasahan permukaan, (a) tidak terbasahi, (b) menyebar, (c) menyebar .....	23
Gambar 2.8	Hasil SEM fiber membran PP (Accurel PP Q3/2), (a) Sebelum perendaman, (b) Setelah perendaman dengan air selama 7 hari ...	25
Gambar 2.9	Struktur kimia PZ .....	31
Gambar 2.10	Struktur molekul (a) amina primer (b) gugus guanidium.....	31
Gambar 2.11	Struktur kimia <i>Arginine</i> .....	32
Gambar 2.12	Struktur kimia MSG .....	32
Gambar 3.1	Rangkaian alat kontaktor membran untuk proses absorpsi CO <sub>2</sub> ...	39
Gambar 3.2	Rangkaian alat kontaktor membran untuk proses desorpsi CO <sub>2</sub> ...	40
Gambar 3.3	Rangkaian alat proses absorpsi-desorpsi CO <sub>2</sub> secara simultan .....	41
Gambar 3.4	Diagram alir percobaan proses absorpsi.....	43
Gambar 3.5	Diagram alir percobaan proses desorpsi.....	44
Gambar 3.6	Diagram alir penelitian absorpsi-desorpsi secara simultan .....	45
Gambar 3.7	Skema alat titrasi <i>chittic</i> .....	47
Gambar 3.8	Contoh Plot Wilson dari penelitian Fang,dkk.(2012).....	49
Gambar 4.1	Pengaruh laju alir pelarut DEA terhadap fluks absorpsi pada berbagai jenis pelarut ( $T_{\text{operasi}} = 31^{\circ}\text{C}$ ; $P_{\text{operasi}} = 1,5 \text{ bar (abs)}$ ; $Q_{\text{gas,in}} = 600 \text{ mL/menit}$ ; $C_{\text{CO}_2,\text{in}} = 40\% \text{ vol}$ ) .....	54
Gambar 4.2	Pengaruh laju alir pelarut MDEA terhadap fluks absorpsi pada	

	berbagai jenis pelarut ( $T_{\text{operasi}} = 31^{\circ}\text{C}$ ; $P_{\text{operasi}} = 1,5 \text{ bar (abs)}$ ; $Q_{\text{gas,in}} = 600 \text{ mL/menit}$ ; $C_{\text{CO}_2,\text{in}} = 40\% \text{ vol}$ ) ..... 54
Gambar 4.3	Profil konsentrasi gas $\text{CO}_2$ pada perpindahan massa gas $\text{CO}_2$ dari fasa gas ke fasa cairan dengan kondisi membran tidak terbasahi. 56
Gambar 4.4	Pengaruh laju alir pelarut DEA terhadap % $\text{CO}_2 \text{ removal}$ absorpsi pada berbagai jenis pelarut ( $T_{\text{operasi}} = 31^{\circ}\text{C}$ ; $P_{\text{operasi}} = 1,5 \text{ bar (abs)}$ ; $Q_{\text{gas,in}} = 600 \text{ mL/menit}$ ; $C_{\text{CO}_2,\text{in}} = 40\% \text{ vol}$ ) ..... 57
Gambar 4.5	Pengaruh laju alir pelarut MDEA terhadap % $\text{CO}_2 \text{ removal}$ absorpsi pada berbagai jenis pelarut ( $T_{\text{operasi}} = 31^{\circ}\text{C}$ ; $P_{\text{operasi}} = 1,5 \text{ bar (abs)}$ ; $Q_{\text{gas,in}} = 600 \text{ mL/menit}$ ; $C_{\text{CO}_2,\text{in}} = 40\% \text{ vol}$ ) ..... 57
Gambar 4.6	Struktur kimia MSG yang terdiri dari <i>sodium</i> dan <i>glutamic acid</i> ..60
Gambar 4.7	Pengaruh laju alir pelarut terhadap fluks desorpsi pada berbagai jenis pelarut DEA ( $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$ dan $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar (gauge)}$ )..... 62
Gambar 4.8	Pengaruh laju alir pelarut terhadap fluks desorpsi pada berbagai jenis pelarut MDEA ( $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$ dan $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar (gauge)}$ ) ..... 63
Gambar 4.9	Profil konsentrasi gas $\text{CO}_2$ pada perpindahan massa gas $\text{CO}_2$ dari fasa cairan ke fasa gas dengan bantuan vakum..... 63
Gambar 4.10	Pengaruh laju alir pelarut terhadap efisiensi desorpsi pada berbagai jenis pelarut DEA ( $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$ dan $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar (gauge)}$ )..... 65
Gambar 4.11	Pengaruh laju alir pelarut terhadap efisiensi desorpsi pada berbagai jenis pelarut MDEA ( $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$ dan $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar (gauge)}$ )..... 65
Gambar 4.12	Pengaruh laju alir pelarut terhadap koefisien perpindahan massa total desorpsi pelarut DEA ( $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$ dan $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar (gauge)}$ )..... 67
Gambar 4.13	Pengaruh laju alir pelarut terhadap koefisien perpindahan massa total desorpsi pelarut MDEA ( $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$ dan $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar (gauge)}$ )..... 68
Gambar 4.14	Pengaruh laju alir pelarut terhadap hambatan perpindahan massa total desorpsi pelarut DEA ( $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$ dan $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar (gauge)}$ ) ..... 69



Gambar 4.15	Pengaruh laju alir pelarut terhadap hambatan perpindahan massa total desorpsi pelarut MDEA ( $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$ dan $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar (gauge)}$ ).....	70
Gambar 4.16	Plot Wilson untuk pelarut DEA ( $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$ dan $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar (gauge)}$ ) .....	71
Gambar 4.17	Plot Wilson untuk pelarut MDEA ( $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$ dan $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar (gauge)}$ ) .....	71
Gambar 4.18	Perbandingan hambatan perpindahan massa untuk pelarut DEAdan campurannya : (a) DEA (b) DEA-PZ (c) DEA-Arginin (d) DEA-MSG .....	72
Gambar 4.19	Perbandingan hambatan perpindahan massa untuk pelarut MDEA dan campurannya : (a) MDEA (b) MDEA-PZ (c) MDEA-MSG .....	73
Gambar 4.20	Pengaruh waktu operasi terhadap fluks absorpsi ( $C_{\text{CO}_2,\text{in}} = 40\% \text{ vol}$ ; $Q_g = 600 \text{ ml/menit}$ ; $Q_l = 100 \text{ ml/menit}$ ; $T = 70^{\circ}\text{C}$ ; $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar (gauge)}$ ).....	74
Gambar 4.21	Pengaruh waktu operasi terhadap $\% \text{CO}_2 \text{ removal}$ absorpsi ( $C_{\text{CO}_2,\text{in}} = 40\% \text{ vol}$ ; $Q_g = 600 \text{ ml/menit}$ ; $Q_l = 100 \text{ ml/menit}$ ; $T = 70^{\circ}\text{C}$ ; $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar (gauge)}$ ).....	76
Gambar A.1	Kalibrasi <i>flow meter liquid</i> .....	A-1
Gambar C.1	Rangkaian alat percobaan absorpsi dan desorpsi menggunakan kontaktor membran <i>hollow fiber</i> .....	C-1
Gambar C.2	Pressure gauge dan <i>flow meter gas</i> .....	C-1
Gambar C.3	Pressure gauge dan <i>flow meter liquid</i> .....	C-1
Gambar C.4	Pressure gauge vakum .....	C-2
Gambar C.5	Alat titrasi chittic .....	C-2

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat fisika karbondioksida (CO <sub>2</sub> ) .....	7
Tabel 2.2	Spesifikasi batas konsentrasi gas CO <sub>2</sub> dalam proses industri.....	8
Tabel 2.3	Persamaan prediksi koefisien perpindahan massa untuk aliran fluida dalam lumen.....	17
Tabel 2.4	Temperatur transisi gelas ( $T_g$ ) polimer.....	22
Tabel 2.5	Perbandingan pelarut alkanolamina .....	27
Tabel 2.6	Penelitian terdahulu mengenai absorpsi-desorpsi CO <sub>2</sub> menggunakan kontaktor membran .....	33
Tabel 3.1	Data karakteristik membran polipropilena .....	38
Tabel A.1	Laju alir <i>liquid</i> yang telah dikalibrasi.....	A-1
Tabel A.2	Nilai viskositas ( $\mu$ ) dan densitas ( $\rho$ ) untuk pelarut DEA dan DEA + aktivator .....	A-7
Tabel A.3	Nilai viskositas ( $\mu$ ) dan densitas ( $\rho$ ) untuk pelarut MDEA dan MDEA + aktivator .....	A-7
Tabel B.1	Hasil perhitungan fluks absorpsi dan %CO <sub>2</sub> <i>removal</i> untuk pelarut DEA .....	B-1
Tabel B.2	Hasil perhitungan fluks dan efisiensi desorpsi untuk pelarut DEA.....	B-3
Tabel B.3	Hasil perhitungan fluks absorpsi dan %CO <sub>2</sub> <i>removal</i> untuk pelarut MDEA .....	B-4
Tabel B.4	Hasil perhitungan fluks dan efisiensi desorpsi untuk pelarut MDEA .....	B-5
Tabel B.5	Hasil percobaan titrasi chittic untuk sampel <i>sales gas</i> menggunakan pelarut DEA.....	B-6
Tabel B.6	Hasil percobaan titrasi chittic untuk sampel <i>rich solvent</i> absorpsi menggunakan pelarut DEA .....	B-9
Tabel B.7	Hasil percobaan titrasi chittic untuk sampel <i>sales gas</i> menggunakan pelarut MDEA .....	B-11

Tabel B.8	Hasil percobaan titrasi chittic untuk sampel <i>rich solvent</i> absorpsi menggunakan pelarut MDEA .....B-13
Tabel B.9	Hasil percobaan titrasi chittic <i>rich solvent</i> desorpsi untuk pelarut DEA .....B-15
Tabel B.10	Hasil percobaan titrasi chittic <i>rich solvent</i> desorpsi untuk pelarut MDEA.....B-16
Tabel B.11	Hasil perhitungan Wilson Plot untuk pelarut DEA.....B-18
Tabel B.12	Hasil perhitungan $K_{OL}$ untuk pelarut DEA.....B-19
Tabel B.13	Nilai hambatan individu untuk pelarut DEA .....B-19
Tabel B.14	Hasil perhitungan Wilson Plot untuk pelarut MDEA .....B-20
Tabel B.15	Hasil perhitungan $K_{OL}$ untuk pelarut MDEA .....B-21
Tabel B.16	Nilai hambatan individu untuk pelarut MDEA.....B-21

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Gas alam merupakan sumber daya alam dengan cadangan terbesar ketiga di dunia setelah batu bara dan minyak bumi. Industri pengolahan gas alam adalah sektor penting dalam memenuhi kebutuhan energi atau bahan bakar di Indonesia. Seperti di bidang transportasi dan rumah tangga, LPG (*Liquid Petroleum Gas*), CNG (*Compressed Natural Gas*), LNG (*Liquid Natural Gas*) dan CBM (*Coal Bed Methane*). Tahun 2015 Indonesia memiliki empat kilang pengolahan LNG, antara lain kilang LNG yang berlokasi di Arun (6,8 MTPA), Bontang Kalimantan Timur (22,6 MTPA), Tangguh di Papua Barat (7,6 MTPA) dan Donggi Senoro Sulawesi Tengah (2 MTPA) (Kementrian ESDM, 2015). Di luar empat kilang yang sudah ada, Indonesia juga memiliki salah satu cadangan gas alam terbesar di dunia, yaitu di Pulau Natuna dengan cadangan gas alam diperkirakan sebesar 50,27 TSCF (Kementrian ESDM, 2012).

Tingginya potensi sumber daya gas alam di Indonesia semakin meningkatkan upaya untuk mengembangkan proses pengolahan yang lebih efektif dan efisien dari segi operasional, ekonomi, maupun lingkungan atau teknologi ramah lingkungan yang membutuhkan sedikit energi. Dalam proses pengolahan gas alam dimana komponen utamanya adalah hidrokarbon harus dipisahkan dari komponen pengotor seperti CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, dan uap air karena dapat mempengaruhi kualitas dan proses pengolahan gas alam lebih lanjut. CO<sub>2</sub> sebagai salah satu pengotor dalam gas alam dapat menyebabkan korosi pada perpipaan dan peralatan jika bereaksi dengan uap air bereaksi menghasilkan H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, selain itu CO<sub>2</sub> mampu menurunkan *heating value* (nilai panas) dari gas alam (Rahim, dkk. 2015). Dalam proses pengolahan LNG (*Liquefied Natural Gas*), kandungan CO<sub>2</sub> harus dihilangkan agar tidak terjadi pembekuan (*icing*) pada saat proses pencairan gas alam (Kartohardjono, dkk. 2007), karena proses tersebut berjalan pada suhu sangat rendah yaitu -161°C sedangkan titik beku CO<sub>2</sub> sekitar -78,4°C (Perry dan Green, 2008). Pada umumnya cadangan gas alam yang dimiliki

Indonesia cukup besar. Diketahui di Natuna memiliki kandungan CO<sub>2</sub> sebesar 71% ; Arun sebesar 13,76% ; Belumai sebesar 28-31% ; Kuala Nangsa sebesar 18-21% ; Libo sebesar 8-22% ; Sumatera Selatan lebih dari 40% pada group C, dan Jambi sebesar 3-57% (Satyana,2007). Oleh karena itu dibutuhkan teknologi pemurnian gas alam yang biasa dikenal dengan istilah *acid gas removal* atau *sweetening gas* agar gas alam dapat memenuhi standar spesifikasi gas alam dengan kandungan CO<sub>2</sub> sebesar 2-3% (GPSA, 2004).

Teknologi pemisahan gas CO<sub>2</sub> yang umum digunakan adalah absorpsi baik secara fisik maupun secara kimia, pemisahan kriogenik, adsorpsi dan penggunaan teknologi membran. Teknologi absorpsi dengan menggunakan pelarut telah banyak digunakan di industri, yaitu dengan menggunakan kolom *absorber* dan *scrubber*. Namun teknik tersebut memiliki beberapa masalah operasional antara lain terjadinya *foaming*, *flooding*, *entrainment* dan *channeling*. Selain itu, teknologi konvensional menggunakan kolom *absorber* dan *scrubber* juga memiliki beberapa kelemahan, yaitu ukuran alat besar, biaya operasional mahal, dan membutuhkan energi yang besar. (Mansourizadeh dan Ismail 2009)

Untuk mengatasi permasalahan di atas, teknologi kontaktor membran sudah banyak dikembangkan sebagai teknologi alternatif untuk memisahkan gas CO<sub>2</sub> dari gas alam. Teknologi kontaktor membran menggabungkan proses absorpsi gas dengan pelarut dan teknologi membran sehingga pengaturan pola aliran dapat dilakukan untuk menghindari kemungkinan *flooding*, *loading*, *entrainment*, *channeling* yang umum terjadi pada teknologi absorpsi gas-cair konvensional. Kelebihan teknologi kontaktor membran jika dibandingkan dengan teknologi konvensional adalah memiliki luas kontak gas-liquid yang lebih besar, ukuran alat yang lebih kecil, bersifat modular, yaitu mudah untuk di-*scale up* , dan laju alir gas dan liquid dapat diatur dengan mudah secara independen sehingga dapat mengatasi masalah operasional. (Mansourizadeh dan Ismail 2009)

Feron dan Jansen 1995 melakukan penelitian dalam proses pemisahan gas CO<sub>2</sub> secara hibrid konvensional menggunakan kontaktor membran untuk proses absorpsi dan kolom regenerasi untuk proses desorpsi dengan pelarut amina primer, yaitu *methylethanolamine* (MEA). Mereka membandingkan kinerja

absorber membran dengan kinerja absorber *packed column*. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa dengan kinerja absorpsi CO<sub>2</sub> yang sama pada kolom absorber konvensional, ukuran kolom absorber dapat dikurangi sepuluh kali lipat dengan menggunakan membran absorber.

Teknologi membran semakin berkembang dengan munculnya penelitian tentang desorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan teknologi membran untuk regenerasi pelarut. Namun perlu diperhatikan bahwa penelitian tentang desorpsi CO<sub>2</sub> melalui kontakor membran masih sedikit. Pelarut yang kaya CO<sub>2</sub> harus dipanaskan terlebih dahulu karena kinetika reaksi dari regenerasi pelarut semakin tinggi dengan meningkatnya suhu pelarut. Sehingga unit operasi regenerasi pelarut memerlukan energi yang lebih besar, diperkirakan kebutuhan energi untuk desorpsi CO<sub>2</sub> mencapai 15-30% dari produksi pembangkit energi pembakaran batu bara (Fang, dkk. 2009). Oleh karena itu, perlu dilakukan banyak penelitian tentang CO<sub>2</sub> *stripping* melalui kontakor membran dengan biaya operasi dan biaya kapital yang rendah.

Metode desorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan kontakor membran dapat dilakukan dengan metode vakum atau gas alir (*sweep gas*). Kosaraju, dkk. 2005 melakukan penelitian menggunakan kontakor membran *polypropylene* (PP) dengan menggabungkan proses absorpsi dan desorpsi CO<sub>2</sub>. Mereka melakukan proses absorpsi dan desorpsi CO<sub>2</sub> pada dua modul kontakor membran yang terpisah secara kontinyu selama 55 hari menggunakan *novel solvent* dan gas helium sebagai *stripping gas*. Hasil menunjukkan bahwa kinerja kontakor membran stabil dan material membran PP tidak terbasahi oleh pelarut. Mansourizadeh dan Ismail (2011) juga melakukan penelitian serupa menggunakan material membran *polivinilidenefluorid* (PVDF) dengan dua modul terpisah untuk absorpsi dan desorpsi menggunakan pelarut air dan gas N<sub>2</sub> sebagai *stripping gas*. Hasil menunjukkan bahwa suhu pelarut juga mempengaruhi efisiensi desorpsi CO<sub>2</sub>, yaitu semakin tinggi dengan meningkatkan suhu pelarut. Sedangkan peningkatan laju alir pelarut dapat menurunkan fluks desorpsi.

Desorpsi CO<sub>2</sub> untuk regenerasi pelarut menggunakan vakum kontakor membran dilakukan oleh Fang, dkk. (2009). MEA dengan banyak kandungan CO<sub>2</sub> dialirkan ke bagian lumen membran PP kontakor membran serat berongga dan

bagian *shell* membran ditekan dengan menggunakan pompa vakum, serta mengalirkan *steam* suhu rendah yang berperan sebagai *sweep gas* untuk meningkatkan performansi desorpsi supaya tidak terjadi *liquid loss*. Hasil menunjukkan bahwa desorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan teknologi vakum membran menunjukkan performansi yang baik dan dapat mengurangi konsumsi energi karena dioperasikan pada suhu rendah.

Banyak penelitian absorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub> dengan kontaktor membran masih menggunakan pelarut tunggal tanpa ada campuran aktivator, seperti Khaisri, dkk. (2011), Lv, dkk. (2012), dan Fang, dkk. (2009) yang menggunakan MEA sebagai pelarut. Kemudian Mansourizadeh dan Ismail (2011), Karoor dan Sirkar (1993), menggunakan air, serta beberapa penelitian lain yang menggunakan NaOH, MDEA (*methildiethanolamine*), ataupun DEA (Rangwala, 1996). Beberapa amina memiliki beberapa kelemahan masing-masing, yaitu seperti amina golongan primer dan sekunder yang laju reaksinya lebih cepat dibandingkan amina golongan tersier, namun amina golongan tersier memiliki kapasitas absorpsi yang lebih tinggi dibandingkan amina primer dan sekunder (Mandal, dkk. 2003).

Yeon, dkk. (2004) melakukan absorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan kontaktor membran untuk absorpsi dan kolom stripper untuk regenerasi pelarut dengan mencampurkan *piperazine* dan *triethanolamine* (TEA) sebagai pelarut. Hasil menunjukkan bahwa TEA yang memiliki kapasitas absorpsi rendah dapat ditingkatkan dengan penambahan *piperazine*. TEA adalah amina tersier dengan volatilitas yang tinggi dapat membantu membran serat berongga terjaga dari fenomena pembasahan. Kemudian Hedayat, dkk. (2011) melakukan penelitian untuk absorpsi gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S dari gas alam menggunakan kontaktor membran dengan membandingkan pelarut MDEA dicampur dengan MEA dan MDEA dengan DEA. Dari hasil penelitiannya, penambahan MEA ke dalam MDEA dapat meningkatkan efisiensi pemisahan CO<sub>2</sub>, sedangkan penambahan DEA tidak memberikan hasil yang signifikan. Rahim, dkk. 2015 menggunakan empat pelarut *amino acid salt* (AAS) yang berbeda dan dibandingkan dengan larutan MEA dan NaOH. Hasil menunjukkan bahwa AAS dapat meningkatkan performansi dari absorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub> jika dibandingkan dengan MEA.



## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas, penelitian tentang absorpsi dan desorpsi gas CO<sub>2</sub> menggunakan kontaktor *hollow fiber* membran sudah banyak dilakukan. Pentingnya pemisahan gas CO<sub>2</sub> dalam proses pengolahan gas alam menjadi faktor yang mendorong adanya teknologi alternatif untuk mengatasi permasalahan yang terjadi pada proses pemisahan gas CO<sub>2</sub> menggunakan kolom konvensional.

Pelarut yang banyak digunakan dalam penelitian – penelitian sebelumnya adalah pelarut golongan alkanolamina yang juga telah banyak digunakan dalam industri. Beberapa jenis alkanolamina yang sering digunakan adalah amina primer : monoetanolamina (MEA), sekunder : dietanolamina (DEA), dan sekunder diethanolamina (MDEA). Amina primer dan sekunder memiliki laju reaksi yang lebih cepat dibandingkan dengan amina tersier. Namun amina tersier memiliki kapasitas CO<sub>2</sub> yang lebih besar dibandingkan dengan amina primer dan sekunder. Sehingga untuk meningkatkan efisiensi kerja absorpsi dan desorpsi, pelarut alkanolamina ditambahkan dengan beberapa aktivator untuk menekan kelemahan yang dimiliki.

Pada penelitian ini, pelarut yang digunakan adalah golongan alkanolamina sekunder dan tersier, yaitu DEA dan MDEA. Aktivator yang digunakan antara lain piperazine (PZ) , arginin, mono sodium glutamat (MSG). Aktivator PZ yang banyak digunakan dalam industri memiliki kelemahan dalam segi harga yang mahal. Maka dari itu, dalam penelitian ini akan digunakan arginin dan MSG sebagai aktivator yang lebih ekonomis. Arginin dan MSG adalah golongan garam asam amino yang memiliki gugus fungsional identik dengan golongan alkanolamina, sehingga dapat bereaksi dengan CO<sub>2</sub> dengan cara yang sama. Penggunaan campuran pelarut amina tersebut diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pemisahan CO<sub>2</sub> dan mengurangi biaya penggunaan pelarut sehingga lebih ekonomis. Selain itu, untuk meningkatkan laju desorpsi dan mengurangi kebutuhan energi akan panas yang dibutuhkan, proses desorpsi pada penelitian ini dilakukan dengan metode vakum dan suhu pemanasan pelarut pada 70°C. Pengaruh dari laju alir pelarut dalam penelitian ini akan dipelajari untuk dapat meningkatkan fluks absorpsi-desorpsi dan efisiensi CO<sub>2</sub> *removal* dari gas alam, serta untuk menentukan koefisien perpindahan massa CO<sub>2</sub>.

### 1.3 Batasan Masalah

1. Serat membran yang digunakan dalam modul kontaktor membran terbuat dari membran polipropilena (PP).
2. Proses absorpsi dan desorpsi dengan kontaktor membran dilakukan dengan dua modul yang berbeda atau secara terpisah.
3. Pelarut yang digunakan adalah campuran dari MDEA dan DEA dengan aktivatornya, yaitu *piperazine* (PZ), *arginine*, dan *mono sodium glutamate* (MSG).
4. Proses desorpsi dilakukan pada  $T = 70^{\circ}\text{C}$  dan  $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar (gauge)}$
5. Proses absorpsi dilakukan pada  $T = 31^{\circ}\text{C}$  dan  $P = 1,5 \text{ bar (abs)}$

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini, yaitu:

1. Mengetahui pelarut yang efektif untuk proses absorpsi dan desorpsi  $\text{CO}_2$  berdasarkan nilai laju perpindahan massa (fluks) dan efisiensi  $\text{CO}_2$  *removal*.
2. Mengetahui pengaruh aktivator dalam pelarut terhadap proses absorpsi dan desorpsi  $\text{CO}_2$  menggunakan kontaktor membran.
3. Mengetahui koefisien perpindahan massa  $\text{CO}_2$  pada proses desorpsi.
4. Mempelajari pengaruh parameter operasi terhadap fluks absorpsi dan desorpsi  $\text{CO}_2$  dan nilai efisiensi  $\text{CO}_2$  *removal* pada modul kontaktor membran secara simultan.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Dapat dijadikan sebagai referensi atau rujukan dalam pengaplikasian kontaktor membran untuk absorpsi-desorpsi  $\text{CO}_2$  dalam proses pengolahan gas alam.
2. Keberhasilan penelitian ini bermanfaat dalam upaya penghematan energi, biaya, dan kebutuhan pelarut untuk proses pemisahan gas  $\text{CO}_2$  di industri gas alam.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Karbondioksida (CO<sub>2</sub>)

Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) adalah senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen yang terikat secara kovalen dengan sebuah atom karbon. Berbentuk gas pada temperatur dan tekanan atmosfer. Gas CO<sub>2</sub> termasuk oksida asam dan tidak berbentuk cair pada tekanan dibawah 5.1 atm, tetapi berbentuk padat pada temperatur di bawah -78<sup>0</sup>C. Dalam bentuk padat, CO<sub>2</sub> disebut *dry ice*. Densitas CO<sub>2</sub> pada keadaan standar ialah 1.98 kg/m<sup>3</sup>. Data sifat fisik dari CO<sub>2</sub> disajikan dalam Tabel 2.1 berikut.

**Tabel 2.1** Sifat fisika karbondioksida (CO<sub>2</sub>)

Sifat	Nilai
Titik didih	-57,5 °C
Titik beku normal	-78,4 °C
Temperatur kritis	38 °C
Tekanan kritis	0,6 Kg/cm <sup>2</sup> .G
Panas peleburan	1900 Kal/mol
Panas penguapan	6030 Kal/mol

(Sumber: Perry, 2008)

Karbondioksida (CO<sub>2</sub>) merupakan gas yang bersifat asam dan jika bereaksi dengan air dapat membentuk senyawa yang bersifat asam kuat, yaitu asam karbonat (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) yang dapat menyebabkan korosi pada sistem perpipaan dan peralatan proses. Dalam proses pencairan gas alam (LNG), terdapat kontaminan berupa gas-gas impuritis yang harus dihilangkan agar tidak terjadi pembekuan pada temperatur yang sangat rendah. Karena proses pencairan gas alam berjalan pada suhu -161°C yang akan menyebabkan CO<sub>2</sub> membeku (-78,4°C), sehingga dapat mengganggu proses tersebut (Kartohardjono dkk, 2007).

Keberadaan CO<sub>2</sub> pada industri gas alam dapat menurunkan *heating value* pada gas dan komponen asam dapat menyebabkan korosi pada peralatan. Pada

pipa gas alam, kandungan CO<sub>2</sub> yang d2zinkan sekitar 1-2% mol (Ma'mun, 2005). Dari segi lingkungan, adanya CO<sub>2</sub> yang berlebihan dapat melubangi lapisan ozon, menyebabkan efek rumah kaca, dan pemanasan global dimana salah satu indikatornya adalah bertambahnya gas rumah kaca, terutama gas CO<sub>2</sub>. Gas CO<sub>2</sub> yang keluar meninggalkan kolom harus memenuhi spesifikasi batas gas CO<sub>2</sub> seperti ditunjukkan Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Spesifikasi batas konsentrasi gas CO<sub>2</sub> dalam proses industri

Proses	Batas konsentrasi gas CO <sub>2</sub>
Industri manufaktur	< 0.1% CO <sub>2</sub>
Industri amoniak	< 16 ppm CO <sub>2</sub>
Pemurnian gas alam :	
• Pipa gas	< 1% CO <sub>2</sub>
• Bahan baku LNG	< 50 ppm CO <sub>2</sub>
Sintesa gas untuk produksi kimia (H <sub>2</sub> /CO)	< 500 ppm CO <sub>2</sub>
Gasifikasi batu bara	~500 ppm CO <sub>2</sub>
Industri etilen	~1 ppm CO <sub>2</sub>
Pembangkit tenaga listrik :	
• Pembangkit tenaga listrik NGCC	<0.5% CO <sub>2</sub>
• Pembangkit listrik batubara	<1.5% CO <sub>2</sub>

(Yildirim dkk, 2012)

## 2.2 Kontaktor Membran *Hollow Fiber*

Berbagai teknologi telah digunakan dalam proses pemisahan CO<sub>2</sub> dari gas alam seperti absorpsi, distilasi kriogenik, dan teknologi membran. Teknologi konvensional untuk proses absorpsi CO<sub>2</sub> yang digunakan di dalam industri adalah kolom unggun tetap (*packed column*), kolom gelembung (*bubble column*) dan kolom sembur (*spray column*) Faktor utama yang harus diperhatikan dalam mendesain kolom absorpsi adalah meningkatkan transfer massa antara gas-liquid dengan memperluas luas kontak gas-liquid. Dalam operasionalnya diharapkan ukuran droplet gas-liquid yang kecil dengan jumlah yang banyak pada saat fase

dispersi. Namun, seringkali terjadi permasalahan operasional seperti *entrainment*, *flooding*, *loading*, dan *foaming*. (Gabelman dan Hwang, 1999)

Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan dikembangkannya kontaktor membran *hollow fiber* sebagai teknologi alternatif untuk absorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub> yang memiliki beberapa kelebihan. Membran *hollow fiber* dapat diartikan sebagai membran kapiler yang terdiri dari bagian *tube* dan *shell*, persis seperti *heat exchanger*. Absorben mengalir di dalam *tube* sedangkan aliran gas mengalir di bagian *shell* atau bisa juga sebaliknya. Kelebihan teknologi ini dibanding teknologi absorpsi gas-cairan konvensional adalah terpisahnya aliran gas dan cairan sehingga pengaturan pola aliran dapat bersifat fleksibel untuk menghindari kemungkinan *flooding*, *loading*, dan *entrainment* yang umum terjadi pada teknologi konvensional (Gabelman dan Hwang, 1999). Luas permukaan kontak gas-cairan untuk kolom absorpsi (*packed column*) mendekati 30-300 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> sedangkan kontaktor membran bisa mencapai 1.600-6.600 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> (Mulder, 1996). Hal ini menunjukkan bahwa luas permukaan per volume dari kontaktor membran jauh lebih tinggi sehingga kemungkinan untuk terjadinya perpindahan massa lebih besar. Selain itu, ukuran kontaktor membran jauh lebih kecil dibandingkan kolom absorpsi dan lebih mudah untuk di-*scale up*, yaitu dengan menambah atau mengurangi jumlah serat membran tanpa merubah ukuran modul untuk meningkatkan atau mengurangi kapasitas.

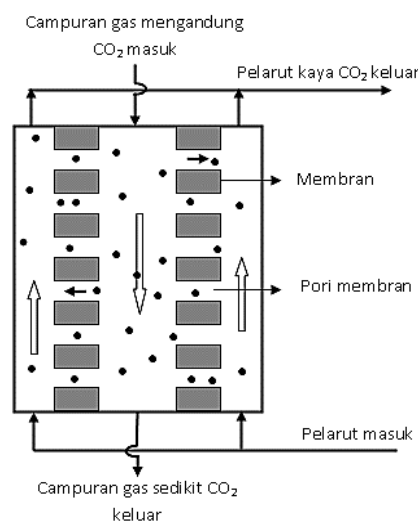
### **2.2.1 Mekanisme Absorpsi – Desorpsi dalam Modul Kontaktor Membran**

Teknologi kontaktor membran untuk pemisahan CO<sub>2</sub> merupakan pengembangan membran poros hidrofobik sebagai media pembatas yang membantu kontak dua fluida dalam proses perpindahan massa tanpa terjadi dispersi dari satu fasa ke fasa lainnya. Terjadinya perpindahan antar fasa pada kontaktor membran didorong oleh adanya beda konsentrasi komponen antara fasa dan penurunan tekanan yang diperlukan untuk menahan interfasa antarfluida. Tekanan fase liquid harus lebih tinggi dari fase gas untuk mencegah terjadinya dispersi gas ke dalam liquid. Selama kelebihan tekanan liquid tidak lebih besar dari tekanan minimum cairan masuk pori membran, maka liquid tidak akan

menembus ke dalam pori membran dan *interface* antara gas-liquid dapat termobilisasi (Mansourizadeh dan Ismail, 2009).

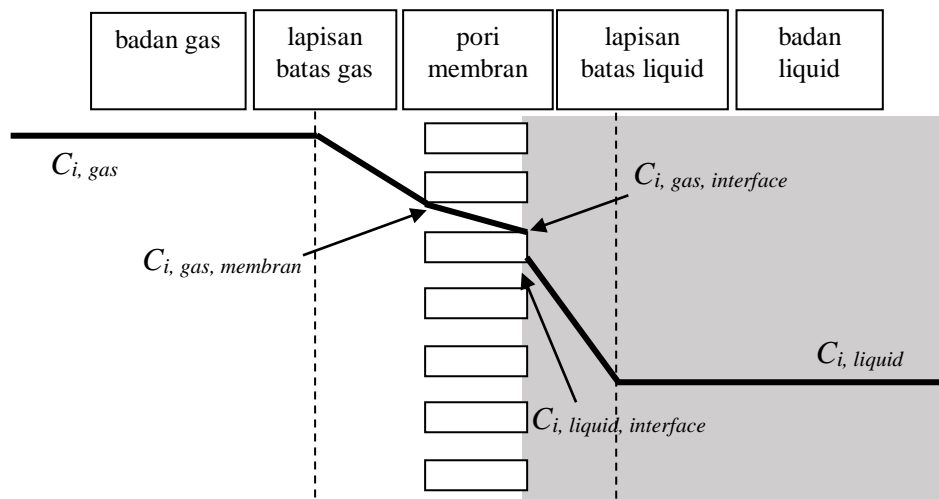
- **Absorpsi**

Absorpsi terjadi saat CO<sub>2</sub> dari aliran gas umpan larut ke dalam liquid melalui pori-pori membran. Proses absorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan kontaktor membran disajikan pada Gambar 2.1. Fase gas akan mengisi pori-pori membran dan mengalami kontak dengan fase liquid yang berada pada sisi lain dari membran.



**Gambar 2.1** Proses pemisahan CO<sub>2</sub> menggunakan kontaktor membran  
[Rahmawati, 2014]

Proses perpindahan massa suatu komponen dari fasa gas ke dalam fasa cairan melewati pori membran terdiri dari tiga tahap, yaitu perpindahan komponen terlarut dalam fasa badan gas ke permukaan membran, perpindahan gas melewati pori membran ke permukaan cairan, dan perpindahan gas dari permukaan cairan ke fasa badan cairan (Mansourizadeh dan Ismail, 2009).

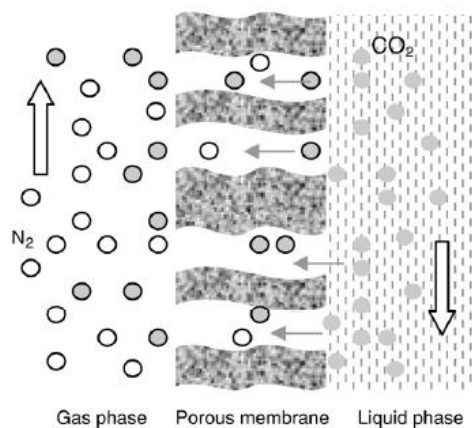


**Gambar 2.2** Perpindahan massa CO<sub>2</sub> dari fase gas ke cair pada kontaktor membrane

Profil konsentrasi CO<sub>2</sub> dari fase gas ke fase cair ditunjukkan pada Gambar 2.2. Gambar di atas menjelaskan mekanisme perpindahan massa CO<sub>2</sub> dari kontaktor membran yang tidak terbasahi. Terjadinya perpindahan massa CO<sub>2</sub> dari gas ke cair disebabkan oleh adanya perbedaan konsentrasi, dapat dilihat bahwa  $C_{i, gas}$  adalah konsentrasi CO<sub>2</sub> dalam badan gas (*bulk of gas*) dimana konsentrasinya paling tinggi akan berdifusi ke dalam fase cair melalui lapisan membran dengan konsentrasi CO<sub>2</sub> yang lebih rendah. Saat gas CO<sub>2</sub> mendekati interfasa cair, gas CO<sub>2</sub> akan larut dan bereaksi dengan pelarut membentuk ion karbamat. Ion karbamat akan berdifusi ke dalam fasa cair dan konsentrasi CO<sub>2</sub> pada interfasa cair ( $C_{i, liquid, interface}$ ) akan turun karena bereaksi dengan CO<sub>2</sub>.

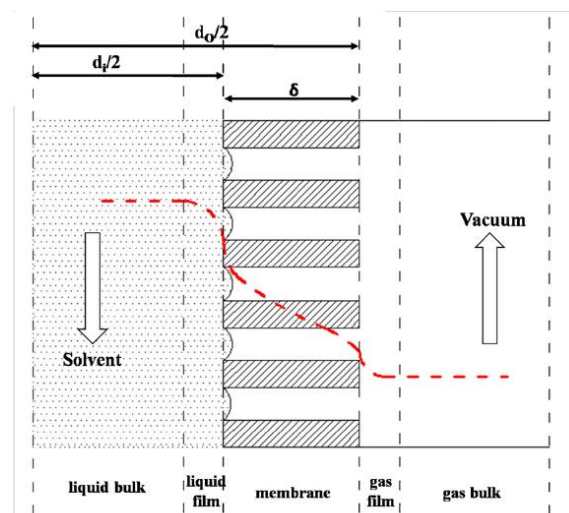
- **Desorpsi**

Pada desorpsi yang bertujuan untuk meregenerasi pelarut, terjadi saat CO<sub>2</sub> di dalam pelarut lepas dan dibawa oleh *stripping gas*. Peristiwa perpindahan massa dari fase cair ke fase gas dalam kontaktor membran disajikan Gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Proses pelepasan CO<sub>2</sub> dari pelarut menggunakan kontaktor membran [Mansourizadeh dan Ismail, 2011]

Pada penelitian ini, perpindahan massa CO<sub>2</sub> dari badan cair ke dalam fase gas dibantu dengan tekanan rendah yang dihasilkan oleh pompa vakum dan kemudian disapu oleh N<sub>2</sub> sebagai *stripping gas*. Profil konsentrasi untuk perpindahan massa dari fase cair ke fase gas disajikan pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.4** Perpindahan massa CO<sub>2</sub> dari fase cair ke gas pada kontaktor membran [Fang, dkk. 2012]

Proses perpindahan massa CO<sub>2</sub> diawali dengan difusi CO<sub>2</sub> pada badan cair kemudian adanya reaksi kimia pada lapisan interfasa membran dan liquid. CO<sub>2</sub> akan berdifusi melalui pori – pori membran menuju badan gas.



### 2.2.2 Model Aliran dalam Modul Kontakor Membran

Modul kontakor membran bisa dioperasikan dalam dua mode aliran, yaitu mode aliran longitudinal dan mode aliran menyilang. (Mansourizadeh dan Ismail 2009)

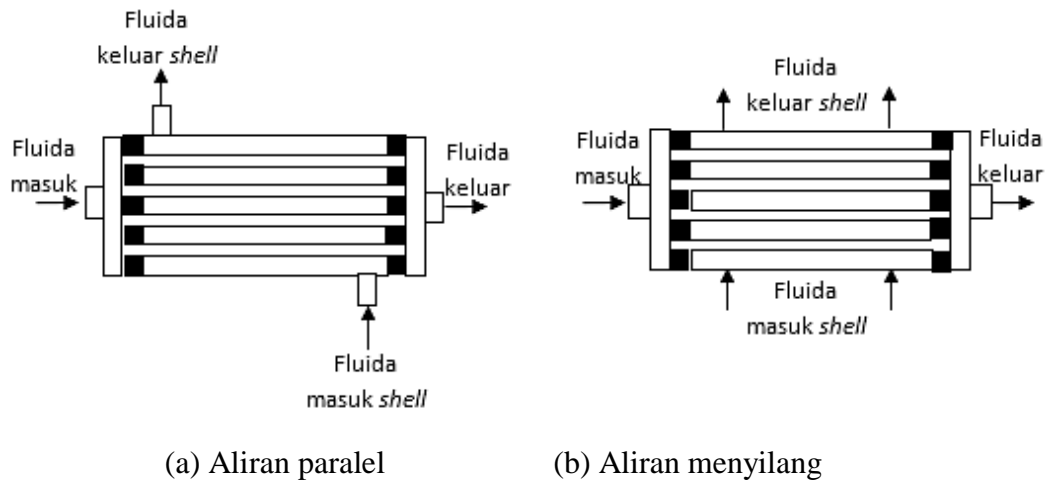
#### a. Mode aliran longitudinal

Pada aliran ini fasa gas dan liquid mengalir secara paralel pada kedua sisi serat membran. Arah aliran terbagi menjadi dua, yaitu aliran searah (*co-current*) dan aliran berlawanan (*counter-current*). Jenis aliran ini banyak dipilih oleh beberapa peneliti untuk melakukan penelitian absorpsi gas dalam skala laboratorium. Pada aliran berlawanan, gaya dorong lebih besar sehingga lebih dipilih pada kondisi dimana tahanan perpindahan massa sisi membran dikontrol (Li dan Chen, 2005), selain itu variasi tekanan transmembran (TMP) relatif tinggi sehingga menyebabkan terjadinya perpindahan dari satu fasa ke fasa lainnya. Pada aliran paralel, koefisien perpindahan massa total dapat menurun jika hambatan perpindahan massa sisi *shell* besar.

#### b. Mode aliran menyilang (*Cross flow module*)

Aliran menyilang adalah aliran fluida di bagian *shell* tegak lurus dengan fiber. Aliran ini lebih atraktif karena dapat merusak lapisan pembatas (*boundary layer*) akibat pemisahan dan pencampuran kontinyu fluida yang mengalir tegak lurus sehingga koefisien perpindahan massa sisi *shell* lebih besar (Gabelman dan Hwang, 1999).

Untuk pola aliran fluida longitudinal dan menyilang pada kontakor membran disajikan dalam Gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Pola aliran pada kontaktor membran [Rahmawati, 2014]

### 2.3 Koefisien Perpindahan Massa

Koefisien perpindahan massa total tergantung pada koefisien perpindahan massa individu yaitu di bagian fasa gas ( $1/k_{ig}$ ), membran ( $1/k_{im}$ ), dan fasa cairan ( $1/k_L$ ) dengan persamaan teoritis hambatan seri sebagai berikut.

$$\frac{1}{K_l} = \frac{1}{k_{il}E} + \frac{1}{k_{im}H} + \frac{1}{k_{ig}H} \dots\dots\dots(2.1)$$

(Kreulen, dkk. 1993)

Ketika menggunakan membran *hollow fiber* dengan cairan di bagian *tube* dan gas mengalir di sisi *shell*, dengan daerah antarfasa gas-cairan berada pada diameter dalam lumen (*nonwetted mode*), maka persamaan 2.1 menjadi:

$$\frac{1}{K_l} = \frac{1}{k_{il}E} + \frac{d_i}{k_{im}Hd_{im}} + \frac{d_i}{k_{ig}Hd_o} \dots\dots\dots(2.2)$$

(Kreulen, dkk. 1993)

H adalah konstanta hukum Henry tak berdimensi yang merupakan perbandingan konsentrasi gas pada keadaan setimbang terhadap konsentrasi pelarut (Qi dan Cussler 1985), E adalah faktor hambatan yang merupakan perbandingan dari fluks absorpsi dengan adanya reaksi kimia terhadap fluks absorpsi dengan tidak ada reaksi kimia (Khaisri, dkk. 2011),  $d_i$ ,  $d_o$ , dan  $d_{im}$  adalah berturut-turut diameter dalam, diameter luar dari *fiber*, dan diameter rata-rata di bagian membran ( $(d_o - d_i) / \ln(d_o / d_i)$ ). Persamaan koefisien perpindahan massa di atas

menggunakan asumsi ukuran pori dan karakteristik pembasahan membran seragam.

Pada proses absorpsi, hambatan perpindahan massa untuk difusi gas dari badan gas ke permukaan luar membran dapat diabaikan dibanding hambatan lainnya (Dindore, dkk. 2004; Karoor dan Sirkar 1993; Rangwala, 1996). Dalam kasus absorpsi gas secara fisik sebagai contoh absorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan air, hambatan perpindahan massa dihubungkan dengan fasa cairan yang bergantung pada hidrodinamika percobaan dan memerlukan laju alir cairan tetap (Mansourizadeh dan Ismail 2009).

Gambar 2.2 menjelaskan fluks pada keadaan tunak dari komponen i melalui lapisan gas sama dengan fluks melalui membran, dan sama dengan fluks melalui lapisan cairan yang didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$J_i = k_{ig}(C_{ig} - C_{img}) = k_{im}(C_{img} - C_{ilg}) = k_{il}(C_{ilg} - C_{il}) \dots \dots \dots (2.3)$$

dimana:

- $k_{ig}$  = koefisien perpindahan massa dalam fasa gas untuk komponen i (m/det)
- $k_{im}$  = koefisien perpindahan massa dalam membran untuk komponen i (m/det)
- $k_{il}$  = koefisien perpindahan massa dalam fasa cairan untuk komponen i (m/det)
- $C_{ig}$  = konsentrasi komponen i dalam fasa gas (mol/L)
- $C_{img}$  = konsentrasi komponen i pada antarfasa gas-membran (mol/L)
- $C_{ilg}$  = konsentrasi komponen i pada antarfasa gas-cairan (mol/L)
- $C_{il}$  = konsentrasi komponen i dalam fasa cairan (mol/L)

Untuk proses desorpsi, perpindahan massa komponen i terjadi dari fasa cairan ke fasa uap dapat menggunakan persamaan yang sama dengan merubah tanda dalam masing-masing fluks.

Koefisien perpindahan massa umumnya dinyatakan dalam bentuk korelasi perpindahan massa. Namun dalam penggunaan modul kontaktor membran, terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi proses perpindahan massa tersebut antara lain : jarak antara serat membran yang tidak seragam, polidispersitas diameter serat membran, pergerakan serat membran selama operasi, pengaruh dinding modul, dan pengaruh aliran masuk dan keluar. Hal yang sering terjadi adalah distribusi menyimpang pada *hollow fiber* terutama di bagian *shell*.

Persamaan korelasi untuk memprediksi koefisien perpindahan massa merupakan model matematik yang penting digunakan dalam desain peralatan perpindahan massa seperti kontaktor membran. Koefisien perpindahan massa dapat diprediksi dari persamaan korelasi sebagai berikut :

$$Sh = a Re^{\alpha} Sc^{\beta} \dots\dots\dots(2.4)$$

Sh, Re, Sc berturut-turut adalah bilangan Sherwood, bilangan Reynold, dan bilangan Schmidt, dimana harga a dan  $\alpha$  ditentukan dari hasil percobaan. Untuk aliran fluida melewati lumen, diameter luar *fiber* ( $d_o$ ) dapat digunakan sebagai karakteristik panjang (Gabelman dan Hwang, 1999). Bilangan tidak berdimensi untuk persamaan korelasi adalah (Qi dan Cussler, 1985):

$$Sh = \frac{k_L d_h}{D_l} \dots\dots\dots(2.5)$$

$$Re = \frac{d_o v}{\nu_l} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$Sc = \frac{\nu_l}{D_l} \dots\dots\dots(2.7)$$

$D_l$  adalah koefisien difusi dari gas dalam cairan ( $m^2/det$ ),  $d_h$  adalah diameter hidraulik dari kontaktor membran, sedangkan  $v$  dan  $\nu_l$  berturut-turut adalah velocity rata-rata dari cairan ( $m/det$ ) dan viskositas kinematik ( $m^2/det$ ).

Koefisien perpindahan massa individu,  $k_g$  dan  $k_l$  utamanya ditentukan oleh geometri kontaktor membran dan kondisi hidrodinamik (Dindore dkk., 2004). Variasi korelasi untuk menentukan koefisien perpindahan massa bergantung pada geometri aliran disajikan dalam Tabel 2.3.

**Tabel 2.3** Persamaan prediksi koefisien perpindahan massa untuk aliran fluida dalam lumen

Persamaan	Keterangan	Pustaka
$Sh = 1,62(Gz)^{0,33} \quad Gz > 20$ $Sh = 3,67(Gz)^{0,33} \quad Gz < 10$	Analogi fluks perpindahan panas laminar secara teoritis	Leveque (1928)
$Sh = 1,86(Gz)^{0,33} \quad Gz > 100$	Analogi fluks perpindahan panas laminar secara empiris	Sieder & Tate (1936)
$Sh = 1,64(Gz)^{0,33} \quad 30 < Gz < 200$	Persamaan empiris untuk absorpsi gas-cairan dalam modul hollow fiber	Yang & Cussler (1986)

Bilangan  $Gz$  (bilangan Graetz) adalah  $(V_L d^2 / D_{AL})$  yang merupakan perbandingan waktu penetrasi dari gas terlarut untuk mencapai antarmuka gas-cairan terhadap waktu tinggal rata-rata dari cairan dalam *fiber* dengan persamaan sebagai berikut:

$$Gz = \frac{v_L d_h^2}{D_L L} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana:

- $v_L$  : velocity dari cairan (m/det)
- $d_h$  : diameter hidraulik dari modul membran (m)
- $D_L$  : difusivitas gas  $CO_2$  dalam pelarut ( $m^2/det$ )
- $L$  : panjang membran (m)

## 2.4 Hambatan Perpindahan Massa Membran

Hambatan perpindahan massa membran bergantung pada gas mengisi pori (*nonwetted mode*) atau cairan mengisi pori (*wetted mode*). Untuk gas mengisi pori keseluruhan atau cairan mengisi pori keseluruhan maka hambatan membran bergantung pada berturut-turut difusivitas absorpsi gas di fasa gas atau difusivitas gas di fasa cairan, karakteristik geometri membran yaitu ketebalan membran ( $\delta$ ) ( $\mu m$ ), porositas ( $\varepsilon$ ) (-), dan tortuositas ( $\tau$ ) (-). Untuk kondisi operasi tersebut, koefisien perpindahan massa membran ( $k_{mg}$  dan  $k_{ml}$ ) disajikan dengan persamaan:

$$k_{img} = \frac{D_{g,eff} \varepsilon}{\tau \delta} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$k_{iml} = \frac{D_l \varepsilon}{\tau \delta} \dots\dots\dots (2.10)$$

Koefisien difusivitas efektif gas pada pori membran tidak terbasahi ( $D_{g,eff}$ ) adalah ditentukan oleh interaksi antara difusi molekular dan atau interaksi molekul dengan dinding pori membran (difusi Knudsen) yang ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{1}{D_{g,eff}} = \frac{1}{D_{g,m}} + \frac{1}{D_{g,kn}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Untuk pori membran terisi gas, difusi melewati membran dipengaruhi oleh diameter pori ( $d_p$ ) jika (Mulder, 1996, Li dan Chen, 2005):

1.  $d_p < 1 \times 10^{-7}$  m, difusi Knudsen lebih dominan daripada difusi molekular
2.  $d_p > 1 \times 10^{-5}$  m, menggunakan difusi molekular
3.  $1 \times 10^{-7} < d_p < 1 \times 10^{-5}$  m, difusi Knudsen dan molekular berpengaruh

Persamaan koefisien difusi Knudsen adalah sebagai berikut (Fang, dkk. 2012) :

$$D_{g,kn} = 48,5 d_p \left( \frac{T_G}{M} \right)^{0,5} \dots\dots\dots (2.12)$$

Koefisien difusi molekular dari gas CO<sub>2</sub> dapat dihitung dari teori kinetik gas sebagai berikut (Fang, dkk. 2012) :

$$D_{g,m} = \frac{4,36 \times 10^{-5} T^{1,5} \left( \frac{1}{M_{CO_2}} + \frac{1}{M_{CO_2}} \right)^{0,5}}{P \left( V_{CO_2}^{1/3} + V_{CO_2}^{1/3} \right)} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana:

- $d_p$  = diameter pori membran (m)  
 $M$  = berat molekul gas (g/mol)  
 $T$  = temperatur gas (K)  
 $V$  = volume struktur molekul (m<sup>3</sup>)  
 $P$  = tekanan (Mpa)

Untuk pori membran yang sebagian terisi oleh cairan, maka panjang fraksional rata-rata cairan yang masuk pori ( $\beta$ ) ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{1}{k_m} = \frac{\beta}{k_{iml}} + \frac{(1-\beta)}{k_{img}} \dots\dots\dots(2.14)$$

## 2.5 Parameter Operasi pada Kontaktor Membran

Dalam pengoperasian kontaktor membran untuk pemisahan CO<sub>2</sub>, ada beberapa variabel operasi yang dapat mempengaruhi proses pemisahan berdasantara lain :

### a. Laju alir cairan

Hasil Kim dan Yang (2000) menunjukkan bahwa peningkatan koefisien perpindahan massa pada kontaktor membran berbanding lurus dengan laju alir pelarut karena beda konsentrasi pada sisi gas dan cairan semakin tinggi sehingga jumlah CO<sub>2</sub> yang diserap semakin besar. Berdasarkan penelitian dari Kim dan Yang (2000), pada laju reaksi yang tinggi, konsentrasi CO<sub>2</sub> di bagian cairan keluar lebih tinggi jika laju alir cairan lebih rendah, sehingga konsentrasi CO<sub>2</sub> akan menurun dengan meningkatnya laju alir pelarut. Selain itu Lv, dkk. (2012) telah melakukan sebuah penelitian mengenai absorpsi CO<sub>2</sub> dan SO<sub>2</sub> menggunakan kontaktor membran *hollow fiber*, polipropilena, dan hasil menunjukkan bahwa laju alir cairan memberikan pengaruh signifikan terhadap proses absorpsi. Semakin besar laju alir cairan akan meningkatkan efisiensi absorpsi CO<sub>2</sub> dan koefisien perpindahan massa gas ke dalam cairan. Namun, Kosaraju, dkk. (2005) mendapatkan hasil sedikit berbeda yaitu peningkatan laju alir cairan tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap koefisien perpindahan massa.

### b. Konsentrasi pelarut

Kim dan Yang (2000) ; Kumar, dkk. (2002) melakukan penelitian bahwa pemisahan CO<sub>2</sub> semakin meningkat dengan meningkatnya konsentrasi pelarut dan dengan jangka waktu tertentu, pelarut menjadi jenuh sehingga kemampuan menyerap CO<sub>2</sub> berkurang. Kinerja pemisahan ditunjukkan

sebagai persen pemisahan CO<sub>2</sub>, dimana persen pemisahan CO<sub>2</sub> akan optimal (mendekati 100%) pada konsentrasi pelarut tertentu.

#### **c. Laju Alir gas**

Penelitian Lv, dkk. (2012) menunjukkan bahwa laju alir gas berpengaruh terhadap laju absorpsi CO<sub>2</sub>. Laju alir gas yang tinggi menyebabkan jumlah CO<sub>2</sub> yang diabsorpsi semakin meningkat.

#### **d. Tekanan Parsial CO<sub>2</sub>**

Kinerja perpindahan massa, ditunjukkan sebagai fluks CO<sub>2</sub> melalui fiber membran. Feron dan Jansen (1995) melaporkan bahwa pada temperatur ruang, fluks merupakan fungsi rata-rata logaritmik tekanan parsial CO<sub>2</sub>. Pada tekanan parsial CO<sub>2</sub> yang rendah, fluks CO<sub>2</sub> meningkat hampir linear dengan meningkatnya tekanan parsial CO<sub>2</sub>. Sedangkan Kumar, dkk. (2002) memperoleh hasil yang sedikit berbeda dimana tekanan parsial CO<sub>2</sub> mempunyai pengaruh linear terhadap fluks CO<sub>2</sub>.

#### **e. Tekanan campuran gas**

Tekanan gas bisa dimanfaatkan untuk mengatasi permasalahan pembasahan pori membran oleh cairan. Penurunan fluks dan koefisien perpindahan massa terjadi karena adanya hambatan perpindahan massa fiber meningkat akibat pembasahan membran. Jika tekanan gas ditingkatkan, maka cairan yg memasuki pori fiber membran akan didorong balik ke dalam lumen membran. Hedayat, Soltanieh, dan Mousavi (2011) melaporkan bahwa setelah operasi absorpsi selama 14 hari, efisiensi absorpsi dapat meningkat kembali dengan menaikkan tekanan gas. Namun, kenaikan tekanan gas dibatasi oleh tekanan kritis gelembung (*bubbling*) ( $\Delta P_b$ ). Jika tekanan gas dinaikkan melebihi  $\Delta P_b$ , maka akan terjadi gelembung di sisi cairan.

#### **f. Tekanan operasi**

Dindore, dkk. (2004) melakukan percobaan pemisahan CO<sub>2</sub> menggunakan kontaktor membran hingga tekanan 20 bar, diperoleh hasil bahwa fluks akan meningkat dengan meningkatnya tekanan operasi. Namun, tekanan operasi tidak berpengaruh terhadap koefisien perpindahan



massa total tetapi hanya menurunkan koefisien perpindahan massa pada fiber membran. Pada absorpsi fisik, hambatan perpindahan massa sisi cairan memiliki pengaruh yang paling dominan, sehingga hambatan perpindahan massa fiber membran dapat diabaikan dan tidak mempengaruhi koefisien perpindahan massa total. Sedangkan untuk kasus dengan reaksi kimia, hambatan perpindahan massa fiber membran tidak bisa diabaikan karena hambatan sisi cairan lebih rendah dengan adanya faktor hambatan (*enhancement factor*).

#### **g. Temperatur**

Temperatur absorpsi memberikan pengaruh terhadap kinerja perpindahan massa. Pada temperatur yang tinggi, laju reaksi dan laju difusi lebih tinggi, sehingga dapat meningkatkan koefisien perpindahan massa (Feron dan Jansen 2002). Khaisri, dkk. (2011) melaporkan bahwa laju perpindahan massa pada proses desorpsi CO<sub>2</sub> dari pelarut MEA mengalami peningkatan seiring dengan naiknya temperatur. Untuk absorpsi menggunakan pelarut air, pengaruh temperatur justru berlaku sebaliknya, karena dengan kenaikan temperatur menyebabkan uap air mengisi pori membran sehingga difusi gas ke dalam cairan menjadi menurun dan hambatan perpindahan massa fiber membran meningkat.

#### **h. Penempatan Fluida**

Modul kontaktor membran *hollow fiber* menyerupai alat perpindahan panas yang terdiri atas *shell* dan *tube*, dimana yang berfungsi sebagai *tube* adalah membran *hollow fiber* itu sendiri. Fluida dialirkan di bagian lumen dan bagian *shell* dari membran. Untuk kontaktor membran gas-cairan, cairan lebih baik mengalir di dalam lumen dan gas mengalir di sisi *shell*

### **2.6 Karakteristik Membran**

Dalam pemilihan material membran, ada beberapa kriteria dari material yang harus diperhatikan yaitu:

- Stabilitas kimia

Stabilitas kimia dari material membran, memberikan efek terhadap stabilitas jangka panjangnya. Setiap reaksi yang terjadi antara solven dengan

material fiber membran dapat mempengaruhi integritas dan struktur permukaan membran. Agar stabilitas kimia terjamin, bahan pelarut yang digunakan harus kompatibel dengan material membran.

- Stabilitas termal

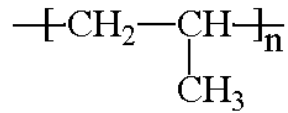
Pada temperatur tinggi, material membran dapat mengalami dekomposisi atau degradasi. Kecenderungan perubahan membran tergantung pada temperatur transisi gelas ( $T_g$ ) polimer untuk polimer amorf atau temperatur leleh ( $T_m$ ) untuk polimer kristalin. Jika melewati temperatur tersebut, sifat polimer akan berubah secara drastis. Temperatur transisi gelas polimer ditentukan oleh struktur kimia seperti fleksibilitas dan interaksi ikatan rantai. Polimer yang mempunyai  $T_g$  lebih tinggi cenderung lebih stabil. Dalam Tabel 2.5 ditunjukkan bahwa PTFE memiliki  $T_g$  lebih tinggi dibandingkan PET dan PP sehingga sifatnya lebih stabil.

**Tabel 2.4** Temperatur transisi gelas ( $T_g$ ) polimer

Polimer	$T_g$ (°C)
Politetrafluoroetilena (PTFE)	126
Polipropilena (PP)	-15
Polietilena (PE)	-120
Polieter sulfon (PES)	230
Polisulfon (PS)	190
Polivinildenefluorid (PVDF)	-40
Polidimetilsiloksana (PDMS)	-123

(Sumber: Mulder, 1996)

Material membran yang umum digunakan pada pemisahan CO<sub>2</sub> dengan kontaktor membran adalah PP dan PTFE. Polipropilena bersifat hidrofobik, tetapi memiliki  $T_g$  yang rendah, sehingga kurang stabil dibanding PTFE dan rentan terhadap pembasahan. Kelebihannya yaitu harganya jauh lebih murah dibanding PTFE.

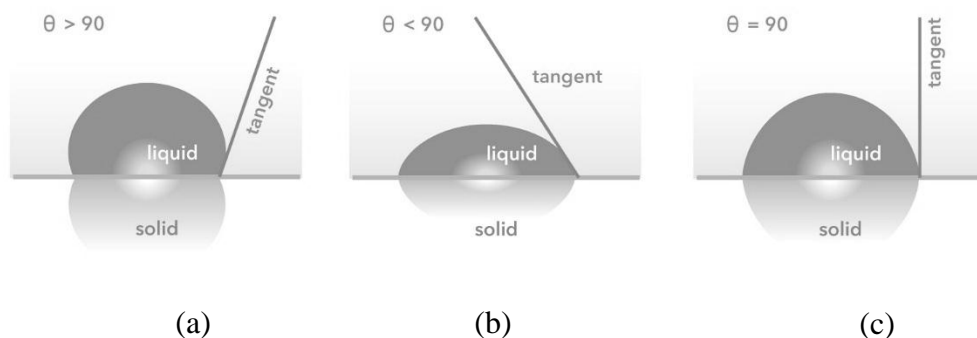


**Gambar 2.6** Struktur polipropilena (PP)

Beberapa penelitian melaporkan bahwa PP cenderung mengalami pembasahan parsial. Misalnya percobaan yang dilakukan Wang, dkk. (2006) yang memperoleh hasil bahwa pada beberapa jam pertama fluks CO<sub>2</sub> cenderung menurun sampai akhirnya bernilai konstan. Hal ini menunjukkan bahwa membran mengalami pembasahan pada awal percobaan dan kemudian stabil.

## 2.7 Fenomena Pembasahan

Fenomena pembasahan terjadi karena adanya pelarut mengisi pori membran. Kecenderungan pembasahan fiber membran disebabkan oleh ukuran pori membran, tegangan permukaan pelarut, dan sudut kontak yang merupakan interaksi antara pelarut dan membran. Ketika tetesan cairan berkontak dengan permukaan fiber membran, bentuk akhir tetesan pada permukaan bergantung pada gaya molekular cairan (kohesi) dan antara cairan dan permukaan (adhesi). Pembasahan fiber membran dapat diprediksi dari sudut kontak yang dibuat oleh tetesan cairan dan permukaan fiber membran seperti disajikan dalam Gambar 2.7.



**Gambar 2.7** Sudut kontak dan pembasahan permukaan, (a) tidak terbasahi, (b) menyebar, (c) menyebar

Permukaan membran terbasahi sempurna ketika sudut kontak adalah nol. Sedangkan pada sudut kontak antara 0° hingga 90° menghasilkan penyebaran tetesan cairan karena adanya gaya molekular di permukaan dan membasahi pori membran. Untuk sudut kontak lebih besar dari 90°, cairan cenderung untuk menjauh dari permukaan membran sehingga tidak membasahi permukaan.

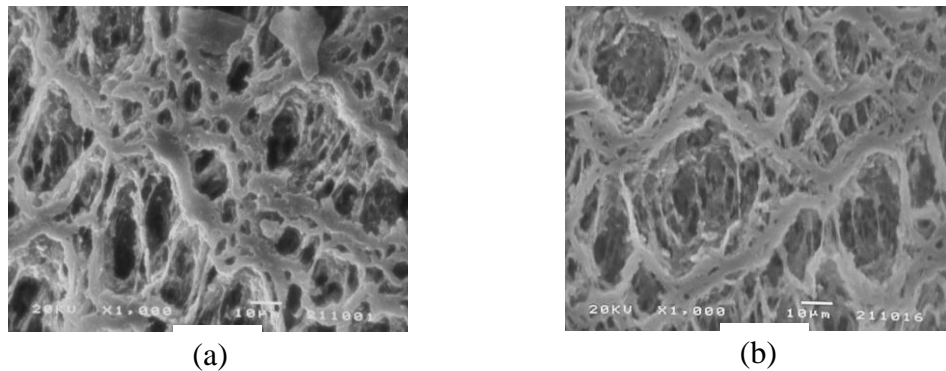
Pori membran hidrofobik yang memiliki energi permukaan rendah seperti politetrafluoroetilena (PTFE) dan polipropilena (PP) akan lebih sulit ditembus pelarut sampai tekanan minimum cairan masuk pori membran (*breakthrough pressure*). Tekanan minimum cairan ini merupakan korelasi antara tegangan permukaan pelarut, sudut kontak pelarut dan fiber membran, serta ukuran pori membran. Hubungan ini ditunjukkan dengan persamaan Laplace-Young sebagai berikut:

$$\Delta P = -\frac{2\gamma_L \cos\theta}{r_{maks}} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dengan  $\gamma_L$  adalah tegangan permukaan pelarut,  $\theta$  adalah sudut kontak antara pelarut dan membran, dan  $r_{maks}$  adalah ukuran pori membran maksimum.

Dari persamaan 2.15 dapat disimpulkan bahwa tekanan minimum cairan dapat meningkat dengan (1) menggunakan fiber membran yang memiliki ukuran pori lebih kecil; (2) meningkatkan sudut kontak antara pelarut dan membran; dan (3) meningkatkan tegangan permukaan pelarut. Kumar, dkk. (2002) melakukan penelitian mengenai pengukuran tekanan minimum cairan untuk sejumlah pelarut alkanolamina dengan membran PTFE dan diperoleh hasil bahwa morfologi permukaan fiber membran dapat berubah dengan adanya pelarut, meniskus air ke dalam pori membran menyebabkan pembesaran pori membran sehingga tekanan minimum lebih rendah dibanding prediksi menggunakan persamaan di atas.

Pengaruh pelarut terhadap morfologi permukaan fiber membran karena pembasahan membran dapat diperoleh dari hasil analisa SEM.



**Gambar 2.8** Hasil SEM fiber membran PP (Accurel PP Q3/2), (a) Sebelum perendaman, (b) Setelah perendaman dengan air selama 7 hari

Gambar 2.8 menunjukkan perbedaan kekasaran dan perubahan ukuran pori membran. Perubahan tersebut kemungkinan adanya intrusi pelarut ke dalam pori membran dan memperbesar pori membran. Intrusi pelarut tersebut karena adanya gaya lateral pada dinding pori menyebabkan bergesernya dinding. Pergeseran dinding pori yang berukuran lebih besar menyebabkan pori lebih kecil akan menurun dan memungkinkan tertutup (Dindore, dkk. 2004).

Pembasahan membran dapat dicegah dengan menjalankan kontaktor membran pada tekanan operasi sisi pelarut lebih rendah dari tekanan minimum cairan. Selain itu, ada beberapa hal yang juga dapat dipertimbangkan yaitu (Li dan Chen, 2005) :

1. Menggunakan membran hidrofobik agar membran lebih tahan terhadap pembasahan oleh pelarut,
2. Modifikasi permukaan membran untuk meningkatkan hidrofobisitas membran,
3. Membran komposit yaitu membran dengan lapisan atas tidak berpori dan lapisan berikutnya mikroporos efektif mencegah pembasahan,
4. Memilih membran *hollow fiber* yang lebih tidak berpori (*dense*) karena lebih fleksibel dalam tekanan gas umpan,
5. Memilih pelarut dengan tegangan permukaan (*surface tension*) yang sesuai dimana tegangan permukaan rendah memudahkan pelarut menembus pori membran,

6. Optimisasi kondisi operasi untuk meningkatkan kinerja absorpsi keseluruhan.

## 2.8 Pemilihan Pelarut Alkanolamina

Pemilihan pelarut yang tepat berperan penting dalam menentukan performansi dari kontaktor membran gas-liquid untuk pemisahan CO<sub>2</sub>. Beberapa pelarut seperti air murni atau larutan encer NaOH, KOH, alkanolamina, dan ammonia telah dipelajari secara eksperimen. (Rahim, Ghasem, dan Al-marzouqi, 2015) Kriteria pemilihan pelarut untuk kontaktor membran antara lain :

- reaktif dengan CO<sub>2</sub>, reaktivitas tinggi akan memberikan laju absorpsi dan fluks massa yang tinggi karena reaksi antara CO<sub>2</sub> dan liquid yang terjadi di pori-pori membran dapat menekan hambatan dari fase liquid (Li dan Chen 2005).
- tegangan permukaan tinggi, karena membran yang digunakan adalah membran hidrofobik, maka pelarut dengan tegangan permukaan rendah cenderung berpenetrasi ke dalam pori membran sehingga dapat menimbulkan fenomena pembasahan (Dindore, dkk. 2004).
- memiliki kompatibilitas kimia dengan material membran, jika terjadi pembasahan membran reaksi antara liquid dan material membran akan mengakibatkan perubahan struktur morfologi membran dan mengurangi tekanan minimum dari membran (Li dan Chen 2005).
- tekanan uapnya rendah dan stabilitas termal yang bagus, untuk reaksi *irreversible* seperti CO<sub>2</sub> dan NaOH kenaikan suhu dapat meningkatkan absorpsi kimia, namun jika liquid mudah menguap dan kemudian menembus pori – pori membran maka dapat meningkatkan hambatan total transfer massa (Li dan Chen 2005).
- penggunaan jangka panjang pada proses absorpsi gas tidak menyebabkan kerusakan pada membran seperti perubahan morfologi permukaan, *swelling*, dan *shrinkage*, meskipun hal tersebut tidak dapat dihindari sepenuhnya
- mudah diregenerasi, regenerasi pelarut dapat mengurangi kebutuhan pelarut dan mengurangi biaya operasi.

Pelarut untuk pemisahan CO<sub>2</sub> yang umum digunakan adalah golongan alkanolamina. Pelarut ini dipertimbangkan karena merupakan basa lemah yang akan bereaksi dengan CO<sub>2</sub> untuk membentuk kompleks dengan ikatan kimia lemah. Ikatan kimia ini mudah dipecah dengan pemanasan, sehingga mudah untuk regenerasi pelarut. Golongan alkanolamina dipilih karena kemampuan menyerap CO<sub>2</sub> tinggi, kecepatan laju absorpsi tinggi, dan biaya regenerasi rendah.

Alkanolamina dapat diklasifikasikan menjadi tiga berdasarkan struktur kimianya, yaitu amina primer, amina sekunder, dan amina tersier. Amina primer memiliki satu rantai alkanol dan dua atom hidrogen yang terikat atom nitrogen, contohnya adalah *Methylethanolamine* (MEA). Amina sekunder memiliki dua rantai atom alkanol dan satu atom hidrogen yang terikat atom nitrogen, contohnya adalah *Diethanolamine* (DEA) dan *Triethanolamine* (TEA). Amina tersier tidak memiliki atom hidrogen, secara langsung terikat atom nitrogen, contohnya adalah *Methyldiethanolamine* (MDEA) (Yildirim dkk, 2012). Kekurangan dan kelebihan dari MEA, DEA, dan MDEA disajikan dalam Tabel 2.6.

**Tabel 2.5** Perbandingan pelarut alkanolamina

Pelarut	Kelebihan	Kekurangan
<i>Monoethanole Amine</i> (MEA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sangat reaktif terhadap CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S.</li> <li>• Mampu menghilangkan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S secara bersamaan.</li> <li>• <i>Recovery</i> CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S tinggi.</li> <li>• Harganya paling murah dibanding pelarut amin lainnya.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alat rentan mengalami korosi, terutama jika konsentrasinya di atas 20% wt.</li> <li>• Mengalami reaksi <i>irreversible</i> dengan COS dan CS<sub>2</sub> sehingga tidak cocok digunakan untuk gas yang mengandung kedua senyawa tersebut.</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tekanan uapnya tinggi sehingga banyak massa yang hilang saat diregenerasi.</li> <li>• Energi yang dibutuhkan untuk regenerasi cukup tinggi.</li> </ul>
<i>Diethanole Amine</i> (DEA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tekanan uapnya lebih rendah dibanding MEA sehingga mengurangi kehilangan massa saat regenerasi.</li> <li>• Dapat digunakan untuk absorpsi gas yang mengandung COS dan CS<sub>2</sub>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dapat bereaksi dengan CO<sub>2</sub> secara <i>irreversible</i> sehingga pelarut ini tidak optimal jika digunakan untuk absorpsi gas dengan kandungan CO<sub>2</sub> yang tinggi.</li> </ul>
<i>Methyl Diethanole Amine</i> (MDEA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tekanan uapnya sangat rendah sehingga dapat digunakan dengan konsentrasi sampai 60% wt.</li> <li>• Sangat selektif terhadap H<sub>2</sub>S.</li> <li>• Tidak korosif.</li> <li>• Banyak digunakan untuk absorpsi dengan kandungan CO<sub>2</sub> yang tinggi.</li> <li>• Energi untuk regenerasi rendah.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Akibat keselektifannya yang tinggi terhadap H<sub>2</sub>S, maka akan terjadi CO<sub>2</sub> <i>slippage</i> sehingga absorpsi CO<sub>2</sub> kurang maksimal. Oleh karena itu pelarut ini biasanya digunakan untuk absorpsi gas CO<sub>2</sub> tanpa adanya H<sub>2</sub>S.</li> </ul>



		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Harganya paling mahal di antara pelarut amin lainnya.</li> </ul>
--	--	---

Sumber: Kohl & Nielsen, 1997: 49-54 ; Kidnay, 2006: 98-99

Disamping pelarut di atas, terdapat formula pelarut yang terdiri dari campuran amina dan aditif yang dikomersilkan oleh *Dow Chemical Company* (GASISPEC) UOP (dan/atau Union Carbide Corp), Amine Guard dan UCARSOL, BASF *Aktiengesellschaft* (Activated MDEA), *sterically hindered amine* yang dikembangkan oleh *EXXON Research and Engineering Company* (Kohl dan Nielsen, 1997). TNO dengan nama CORAL (Feron and Jansen, 2002), 2-(metilamino) etanol (MMEA), 2-(2-aminoetil-amino) etanol (AEEA) (Ma'mun dkk., 2007) dan poliamidoamin (PAMAM) *dendrimer of generation 0* (Kosaraju dkk., 2005).

Mekanisme reaksi dari CO<sub>2</sub> dengan amina primer (R<sub>1</sub>-NH<sub>2</sub> dengan R<sub>1</sub> = (CH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>-OH untuk MEA) atau amina sekunder (R<sub>1</sub>R<sub>2</sub>-NH) adalah pembentukan *zwitterion intermediate* yang kemudian menghasilkan karbamat (Dubois dan Thomas, 2009), seperti diuraikan di bawah ini :

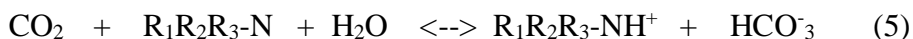


dimana B adalah senyawa basa yang diasumsikan sebagai amina, OH<sup>-</sup> atau H<sub>2</sub>O. Panas absorpsi dihubungkan dengan pembentukan karbamat menjadi lebih tinggi, sehingga menambah biaya regenerasi pelarut (Dubois dan Thomas, 2009).

Untuk amina tersier, (R<sub>1</sub>R<sub>2</sub>R<sub>3</sub>-N dengan R<sub>1</sub> = CH<sub>3</sub> dan R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> = (CH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>-OH untuk MDEA yang tidak memiliki atom hidrogen yang terikat dengan nitrogen, maka reaksinya dengan CO<sub>2</sub> akan menghasilkan bikarbonat (Dubois dan Thomas, 2009), seperti reaksi di bawah ini :



dengan reaksi *overall* sebagai berikut :



Karena reaksi pembentukan karbamat tidak terjadi, reaktivitas atau laju absorpsi dari amina tersier dengan CO<sub>2</sub> rendah. Selain itu, karena panas reaksi dalam pembentukan bikarbonat lebih rendah dari pembentukan karbamat, biaya regenerasi pelarut menjadi lebih rendah. Diketahui bahwa laju absorpsi CO<sub>2</sub> dari amina tersier dapat ditingkatkan dengan menambahkan sejumlah amina primer dan sekunder, atau aktivator absorpsi. (Dubois dan Thomas, 2009).

Saat ini penggunaan pelarut campuran amina dalam proses pengolahan gas semakin banyak. Campuran amina primer dan tersier, seperti campuran MEA dan MDEA atau amina sekunder dengan amina tersier seperti campuran DEA dan MDEA, yang mengkombinasikan kapasitas kesetimbangan lebih tinggi dari amina tersier dengan laju reaksi lebih tinggi dari amina primer atau sekunder, sudah banyak dianjurkan untuk proses industri pengolahan gas dengan tujuan meningkatkan kualitas pelarut (Mandal, Biswas, dan Bandyopadhyay 2003).

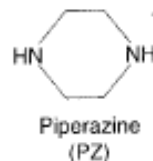
## 2.9 Aktivator Pelarut Absorpsi – Desorpsi CO<sub>2</sub>

Penggunaan promotor pada pelarut untuk proses absorpsi telah banyak digunakan dalam proses industri yang bertujuan untuk meningkatkan performansi absorpsi. Golongan alkanolamina yang banyak digunakan sebagai pelarut ditambahkan aktivator dengan memperhatikan kelebihan dan kekurangannya sehingga dapat dicampurkan untuk saling melengkapi. Contohnya seperti MDEA dengan kapasitas absorpsi CO<sub>2</sub> yang tinggi, namun laju reaksinya lambat dicampur dengan piperazine sebagai aktivator dengan laju reaksi yang tinggi. Sehingga campuran tersebut akan menjadi MDEA-teraktivasi yang memiliki kapasitas dan laju reaksi CO<sub>2</sub> yang tinggi. Beberapa aktivator yang digunakan dalam penelitian ini adalah *piperazine*, *arginine*, dan *monosodium glutamate*.

- *Piperazine*

*Piperazine* atau PZ dengan rumus molekul C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub> adalah aktivator yang paling banyak digunakan untuk golongan alkanolamina. PZ dapat dihasilkan dengan sintesis oleh, misalnya, reaksi monoethanolamine dengan ammonia, atau reaksi etilen oksida dan

$\text{NH}_3$ , dan reaksi siklik etanolamina. Rumus struktur kimia dari PZ adalah :

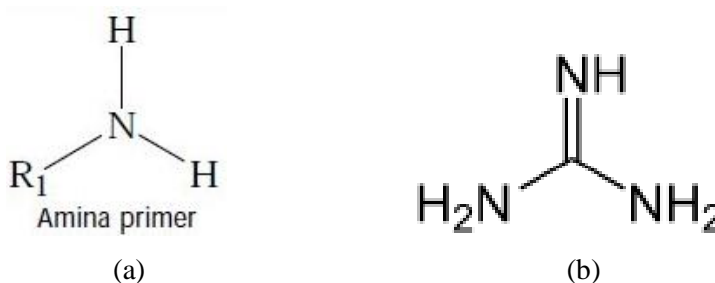


**Gambar 2.9** Struktur kimia PZ

PZ memiliki struktur molekul khusus, yaitu adanya struktur siklik diamino simetris. PZ adalah aktivator yang efisien dan telah banyak sukses digunakan untuk kapasitas pemisahan  $\text{CO}_2$  yang tinggi dalam proses industri.

- *Arginine*

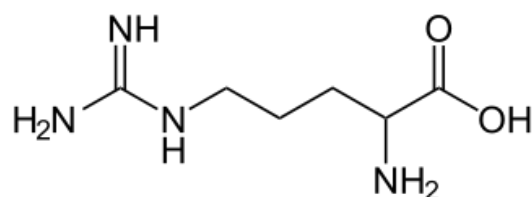
*Arginine* memiliki gugus amino primer dan gugus guanidium. Gugus amina primer adalah ketika satu dari tiga atom hidrogen yang terikat dengan atom nitrogen digantikan dengan gugus alkil atau substituen aromatik. Sedangkan gugus guanidine dengan rumus molekul  $\text{HNC}(\text{NH}_2)_2$  adalah gugus yang bermuatan positif pada kondisi asam, netral, dan basa lemah. Struktur molekul gugus amino primer dan gugus guanidium ditunjukkan oleh **Gambar 2.10** berikut :



**Gambar 2.10** Struktur molekul (a) amina primer (b) gugus guanidium

*Arginin* dipilih sebagai promotor karena merupakan asam amino primer yang dapat membentuk garam asam amino alkalin. Garam asam amino ini diprediksikan sebagai salah satu zat cukup baik

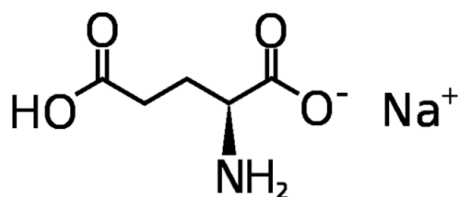
dalam absorpsi CO<sub>2</sub> karena memiliki gugus fungsional yang identik dengan *alkanolamines*. Dalam hal ini garam asam amino diprediksi akan bereaksi dengan CO<sub>2</sub> dengan cara yang sama. Oleh karena itu, *arginine* diprediksikan akan bereaksi dengan CO<sub>2</sub> pada gugus amino primernya. *Arginine* mengandung grup amino primer dan guanidium grup pada rantai sampingnya. Amino grup primer (*arginine*) dan amina tersier (MDEA) diprediksi dapat bereaksi dengan CO<sub>2</sub> dengan cara yang sama. Rumus struktur dari *Arginine* adalah :



**Gambar 2.11** Struktur kimia *arginine*

- *Monosodium glutamate* (MSG)

MSG memiliki rumus kimia C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>NO<sub>4</sub>Na, merupakan salah satu garam – garam asam amino yang terdiri dari *sodium* dan *glutamic acid*. *Glutamic acid* adalah salah satu asam amino non-esensial yang paling banyak ditemukan. *Glutamic acid* merupakan satu dari dua puluh asam amino dasar pembentuk protein (*proteinogenic*). Sebagai asam amino dasar, *glutamic acid* memiliki sebuah atom karbon asimetris yang kemudian berikatan dengan atom Na membentuk MSG. Berikut adalah struktur kimia dari MSG :



**Gambar 2.12** Struktur kimia MSG

Dari struktur di atas terlihat bahwa MSG memiliki satu karbon asimetrik. Karbon tersebut terikat oleh 4 gugus yang saling berbeda sehingga merupakan bentuk isomer yang aktif. Keuntungan dari penggunaan garam asam amino dalam proses penyerapan CO<sub>2</sub> adalah tidak adanya efek kimiawi akibat penguapan dan tingkat degradasinya yang rendah.

## 2.10 Posisi Penelitian

Perkembangan teknologi kontaktor membran mulai dari proses hibrid, yaitu menggabungkan proses absorpsi menggunakan kontaktor membran dan desorpsi menggunakan kolom, sampai dengan dikembangkannya kontaktor membran secara terpisah untuk proses absorpsi dan desorpsi disajikan pada Tabel 2.7.

Penelitian mengenai absorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub> secara terpisah menggunakan kontaktor membran *hollow fiber* dengan pelarut dari golongan alkanolamina bukan penelitian yang pertama, namun pada penelitian kali ini dilakukan dengan jenis campuran pelarut dan kondisi operasi yang berbeda dari penelitian sebelumnya.

**Tabel 2.6** Penelitian terdahulu mengenai absorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan kontaktor membran

Material/ Proses/ Pelarut	Penelitian	Hasil	Referensi
PP/ hibrid/ <i>novel absorption liquid</i>	Penelitian dilakukan pada skala <i>bench</i> untuk aplikasi di bidang biogas, antariksa, kesehatan, kelautan, dan efek gas rumah kaca.	Meningkatnya suhu pelarut (20 – 40 <sup>0</sup> C) dan tekanan parsial CO <sub>2</sub> dapat meningkatkan CO <sub>2</sub> fluks. Sedangkan CO <sub>2</sub> fluks menurun dengan meningkatnya CO <sub>2</sub>	Feron, dkk. (2002)

		loading dari pelarut. Penelitian ini menunjukkan hasil yang lebih efisien dan ekonomis jika dibandingkan dengan kolom konvensional.	
PVDF/ hibrid/ PZ dan TEA	Mempelajari absorpsi CO <sub>2</sub> dengan campuran pelarut alkanolamina (PZ/TEA) dan kinetika reaksi CO <sub>2</sub> dengan mencampurkan PZ dan TEA pada variasi konsentrasi dan pada suhu 303 K – 382 K. Laju absorpsi juga diukur dengan pengaruh tekanan parsial dari CO <sub>2</sub> di dalam liquid.	Peningkatan konsentrasi pelarut dan tekanan parsial CO <sub>2</sub> menunjukkan laju absorpsi CO <sub>2</sub> yang semakin tinggi. Kapasitas absorpsi dari campuran PZ dan TEA dengan CO <sub>2</sub> dipengaruhi oleh konsentrasi piperazine.	Yeon, dkk. (2004)
PP/ simultan dalam dua modul terpisah/ poliamidoamin a (PAMAM) dendrimer generasi 0	Dua modul terpisah untuk absorpsi dan desorpsi secara kontinyu selama 55 hari menggunakan <i>novel solvent</i> dan gas helium sebagai <i>stripping gas</i> .	Kinerja kontaktor membran stabil dan material membran PP tidak terbasahi oleh pelarut.	Kosaraju, dkk. (2005)
PTFE/ simultan dalam dua modul	Absorpsi dan desorpsi dilakukan dengan kondisi operasi yang berbeda	Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi	Mansou- rizadeh, dkk.

terpisah/ air	untuk mengetahui pengaruhnya terhadap efisiensi pemisahan gas CO <sub>2</sub> .	pemisahan CO <sub>2</sub> menunjukkan kenaikan yang signifikan dengan menaikkan suhu pelarut dan. Namun, meningkatkan laju alir pelarut akan menurunkan fluks desorpsi CO <sub>2</sub> .	(2011)
PVDF/ simultan dalam dua modul terpisah/ larutan garam asam amino	Membandingkan penggunaan empat macam larutan garam asam amino yang berbeda sebagai pelarut dengan larutan MEA dan NaOH terhadap performansi absorpsi/desorpsi CO <sub>2</sub> .	Performansi absorpsi dapat ditingkatkan dengan kenaikan laju alir pelarut. Namun laju alir gas memberikan hasil yang berbanding terbalik dengan efisiensi pemisahan, walaupun dapat meningkatkan fluks. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa larutan garam asam amino tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan dengan perubahan suhu terhadap	Rahim, dkk. (2015)

		performansi absorpsi.	
PP/ absorpsi-desorpsi dengan modul terpisah/DEA, DEA-PZ, dan DEA-Arginin	Absorpsi dan desorpsi dilakukan secara terpisah dengan pelarut DEA terkativasi. Fluks dan efisiensi absorpsi dipelajari dengan variasi laju alir gas umpan, sedangkan fluks dan efisiensi desorpsi dipelajari dengan variasi suhu pelarut. Nilai CO <sub>2</sub> <i>removal</i> tertinggi dipilih untuk kemudian diujikan secara simultan selama 150 menit.	Nilai CO <sub>2</sub> <i>removal</i> tertinggi untuk absorpsi adalah pelarut DEA-PZ, sedangkan untuk desorpsi adalah DEA-Arginin. Uji kinerja absorpsi-desorpsi secara simultan menunjukkan kestabilan kinerja setelah berjalan selaman 60 menit pertama.	Yusuf dan Hafan, 2016



## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Garis Besar Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, Teknik Kimia, ITS. Material membran yang digunakan adalah membran *hollow fiber* polipropilena. Pada proses absorpsi, gas yang mengandung CO<sub>2</sub> dialirkan ke bagian *shell* dan pelarut dialirkan ke bagian *tube* membran dari bagian bawah modul membran, sehingga aliran gas dan *liquid* terjadi secara *counter current*. Suhu dan tekanan operasi untuk proses absorpsi adalah pada  $T = 31^{\circ}\text{C}$  dan  $P = 1,5$  bar (abs). Sedangkan untuk proses desorpsi, pelarut yang mengandung kaya CO<sub>2</sub> dialirkan ke bagian *tube* membran dari bawah modul membran dan CO<sub>2</sub> di dalam pelarut akan berdifusi melewati pori membran yang dibantu dengan pompa vakum di bagian *shell*. Suhu pelarut masuk desorpsi ditetapkan  $70^{\circ}\text{C}$  dan tekanan vakum yang digunakan adalah 0,2 bar (gauge), dimana variabel yang divariasikan adalah laju alir pelarut. CO<sub>2</sub> loading untuk pelarut yang masuk desorber adalah 0,24 mol CO<sub>2</sub>/mol pelarut. Pelarut hasil desorpsi diambil sampel setelah proses berlangsung selama 15 menit. Analisa konsentrasi CO<sub>2</sub> di dalam pelarut dan di dalam *sales gas* dianalisa dengan metode titrasi chittic.

#### 3.2 Bahan yang Digunakan

Dalam penelitian ini, material membran yang digunakan adalah membran hidrofobik polipropilena yang diperoleh dari GDP Filter-Indonesia dengan spesifikasi karakteristik membran disajikan dalam **Tabel 3.1**. Konsentrasi gas CO<sub>2</sub> yang masuk ke modul membran 40% vol. yang diperoleh dari PT. Samator Gas. Pelarut yang digunakan untuk proses absorpsi dan desorpsi CO<sub>2</sub> adalah DEA yang diperoleh dari Pertamina RU IV Balikpapan dan MDEA yang diperoleh dari PT Pertamina RU VI Balongan. Aktivator yang digunakan adalah : *piperazine* (PZ), *arginine*, dan *mono sodium glutamate* (MSG).

**Tabel 3.1** Data karakteristik membran polipropilena

Parameter	Modul A*	Modul B**
Diameter dalam ( $d_i$ ) (mm)	0,35	0,35
Diameter luar ( $d_o$ ) (mm)	0,5	0,4
Diameter pori ( $d_p$ ) ( $\mu\text{m}$ )	0,2	0,2
Panjang fiber (mm)	200	300
Jumlah <i>hollow fiber</i>	3302	6500
Porositas	0,65	0,65

\*Modul A digunakan untuk percobaan pelarut DEA dan DEA+aktivator

\*\*Modul B digunakan untuk percobaan pelarut MDEA, MDEA+aktivator, dan simultan

### 3.3 Variabel Penelitian

#### 3.3.1 Kondisi yang Ditetapkan

- **Absorpsi :**

1. Konsentrasi pelarut : 30% berat
2. Konsentrasi aktivator : 1% berat
3. Konsentrasi gas umpan  $\text{CO}_2$  : 40% vol. (60%  $\text{N}_2$ )
4. Laju alir gas umpan absorpsi : 600 mL/menit
5. Tekanan dan suhu operasi :  $P=1,5$  bar (abs) dan  $T=31^\circ\text{C}$

- **Desorpsi :**

1. Konsentrasi pelarut : 30% berat
2. Konsentrasi aktivator : 1% berat
3. Suhu pelarut desorpsi :  $70^\circ\text{C}$
4.  $\text{CO}_2$  loading pelarut : 0,24 mol  $\text{CO}_2$ /mol pelarut
5. Tekanan vakum : 0,2 bar (gauge)

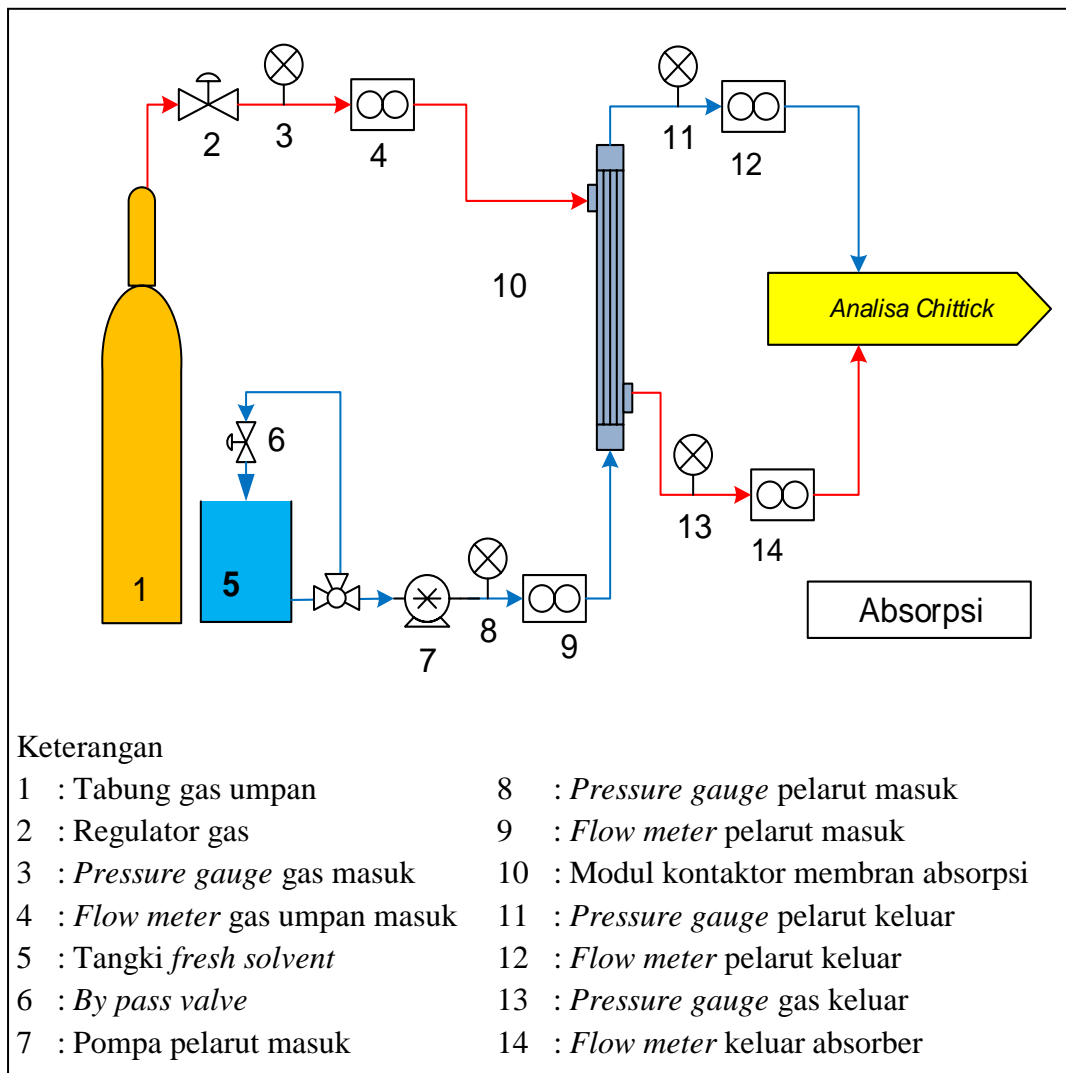
#### 3.3.2. Variabel Masukan

1. Laju alir pelarut : 100, 200, 300, 400, dan 500 L/menit
2. Variasi pelarut dan aktivator :
  - DEA
  - MDEA
  - DEA – PZ
  - MDEA – PZ
  - DEA – Arginin
  - MDEA – MSG
  - DEA – MSG

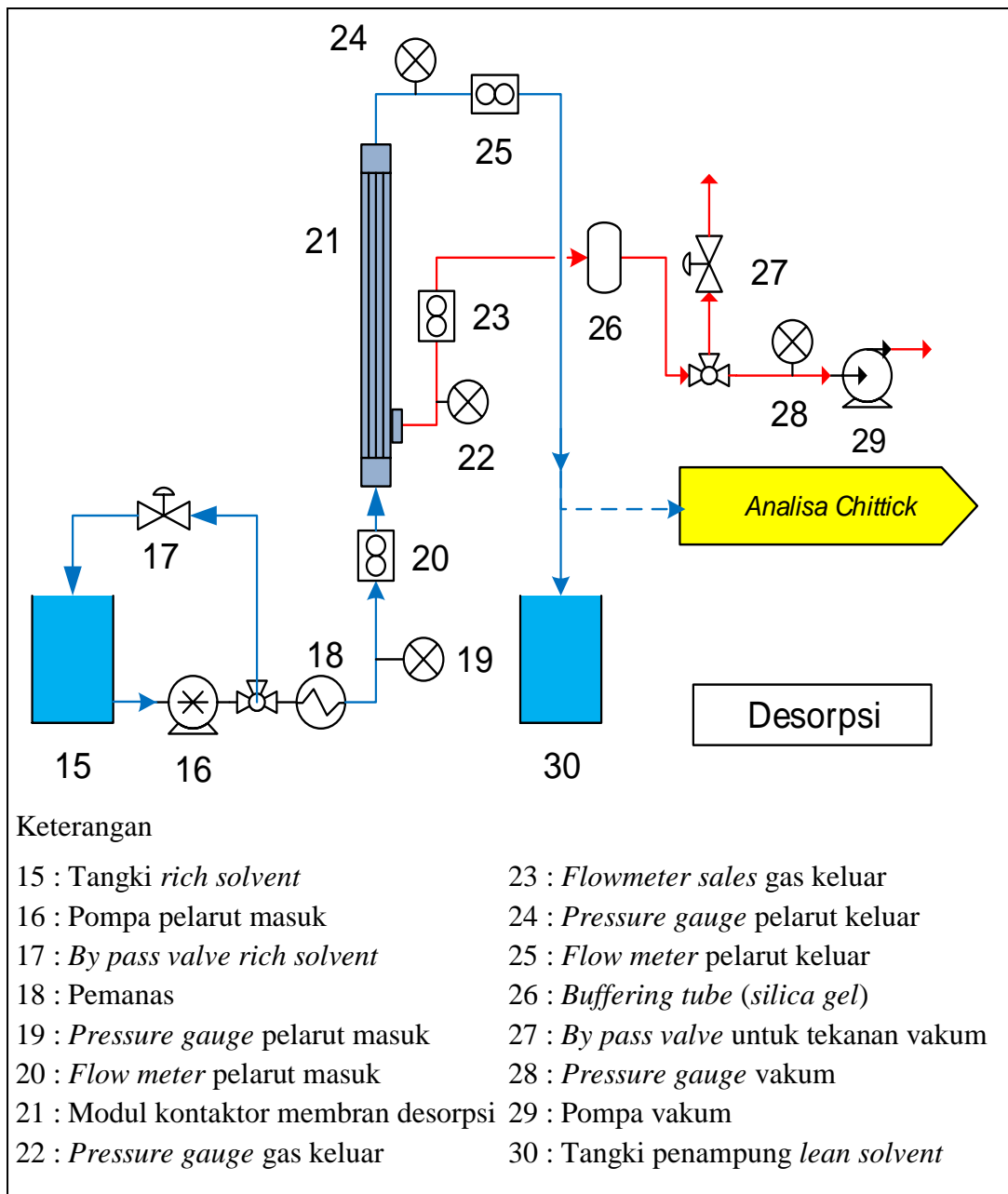
### 3.3.3 Variabel Respon

1. Fluks absorpsi dan desorpsi CO<sub>2</sub>
2. %CO<sub>2</sub> *removal* absorpsi dan % efisiensi desorpsi
3. Koefisien perpindahan massa total untuk proses desorpsi

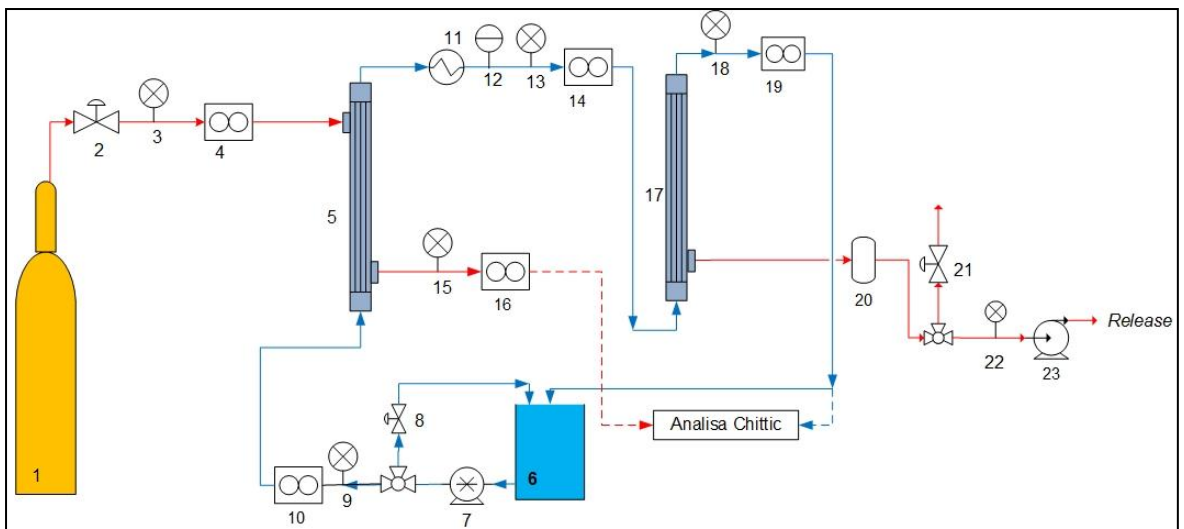
### 3.4 Rangkaian Alat Penelitian



**Gambar 3.1** Rangkaian alat kontaktor membran untuk proses absorpsi CO<sub>2</sub>



**Gambar 3.2** Rangkaian alat kontaktor membran untuk proses desorpsi CO<sub>2</sub>



Keterangan :

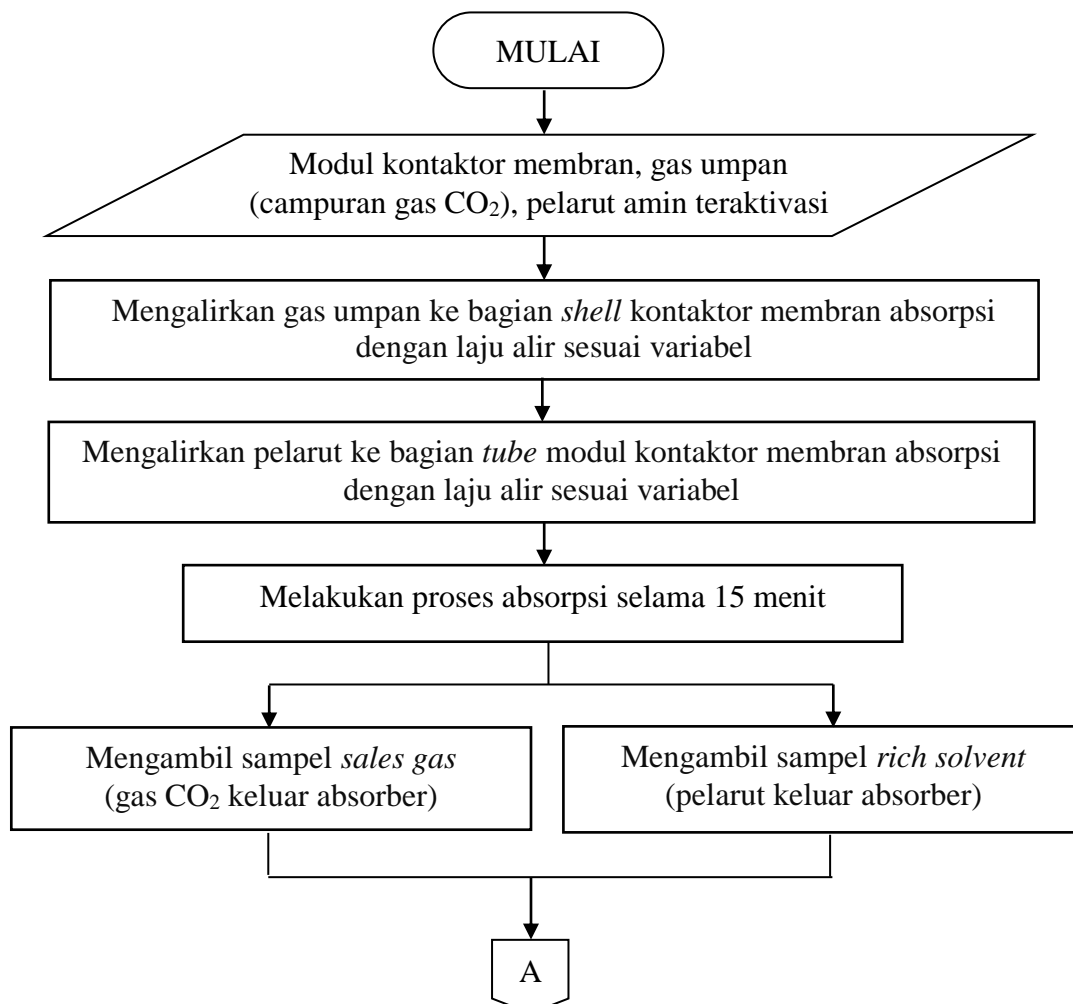
- 1 : Tabung gas umpan (CO<sub>2</sub> 40%)
- 2 : Regulator tabung gas umpan (CO<sub>2</sub> 40%)
- 3 : *Pressure gauge* gas masuk absorber
- 4 : *Flow meter* gas umpan masuk absorber
- 5 : Modul kontaktor membran absorpsi
- 6 : Tangki pelarut
- 7 : Pompa pelarut
- 8 : *By pass valve* untuk pelarut
- 9 : *Pressure gauge* pelarut masuk absorber
- 10 : *Flow meter* pelarut masuk absorber
- 11 : Pemanas
- 12 : *Thermo couple*
- 13 : *Pressure gauge* pelarut masuk desorber
- 14 : *Flow meter* pelarut masuk desorber
- 15 : *Pressure gauge sales* gas keluar absorber
- 16 : *Flow meter sales* gas keluar absorber
- 17 : Modul kontaktor membran desorpsi
- 18 : *Pressure gauge* pelarut keluar desorber
- 19 : *Flow meter* pelarut keluar desorber
- 20 : *Buffering tube* (silica gel)
- 21 : *By pass valve* untuk pompa vakum
- 22 : *Pressure gauge* vakum
- 23 : Pompa vakum

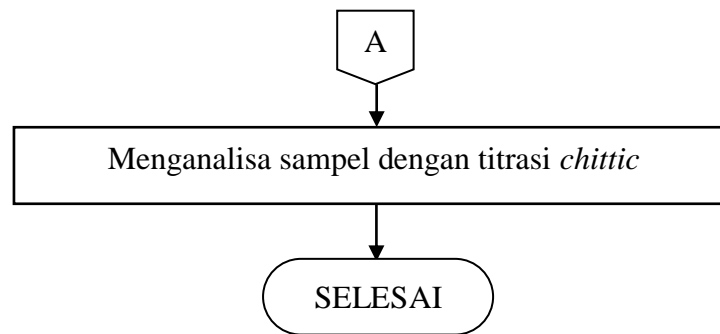
**Gambar 3.3** Rangkaian alat proses absorpsi-desorpsi CO<sub>2</sub> secara simultan

### 3.5 Prosedur Penelitian

#### 3.5.1 Absorpsi

Pada proses absorpsi, gas umpan CO<sub>2</sub> 40% pada P = 1,5 bar (abs) dan T = 31°C (atmosferik) mengalir dengan laju alir gas tertentu melewati *shell* modul membran, sedangkan pelarut pada P = 1,5 bar dan T = 31°C (atmosferik) dialirkan secara kontinyu di bagian *tube* modul membran dengan laju alir tertentu menggunakan pompa dan aliran vertikal terhadap aliran gas. Perpindahan massa gas CO<sub>2</sub> terjadi saat gas CO<sub>2</sub> dari gas umpan berdifusi ke dalam pelarut melalui pori-pori membran yang disebabkan oleh adanya *driving force* konsentrasi CO<sub>2</sub>. Gas yang keluar dari absorber disebut dengan *sales gas* sedangkan pelarut keluar absorber disebut *rich amine*. Konsentrasi CO<sub>2</sub> di dalam *sales gas* dan *rich amine* dianalisa menggunakan titrasi *chittck*. Langkah – langkah percobaan dijelaskan dalam diagram alir berikut ini.

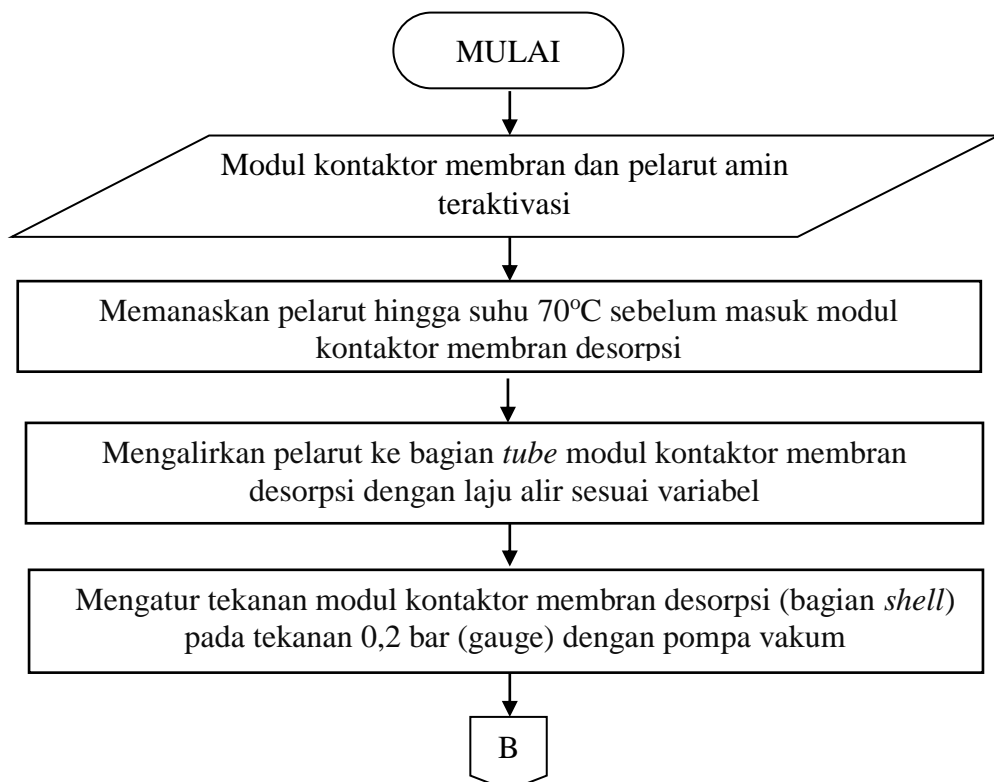


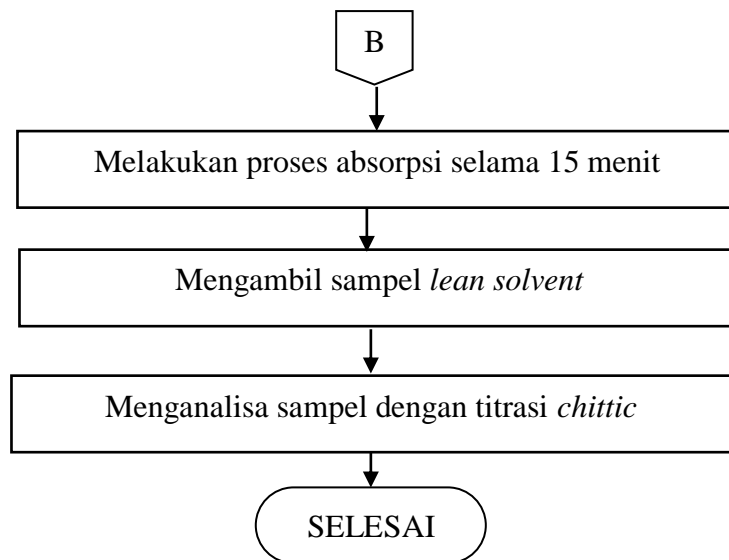


**Gambar 3.4** Diagram alir percobaan proses absorpsi

### 3.5.2 Desorpsi

Pelarut yang mengandung banyak gas CO<sub>2</sub> dari absorber dipanaskan terlebih dahulu sebelum masuk ke dalam desorber. Pemanasan ini bertujuan untuk menurunkan kelarutan CO<sub>2</sub> di dalam pelarut sehingga CO<sub>2</sub> dapat mudah lepas dari pelarut. CO<sub>2</sub> yang terlarut dalam pelarut di bagian *tube* berdifusi keluar melewati pori membran yang dibantu dengan tekanan vakum yang dihasilkan oleh pompa vakum. Pelarut keluar desorber disebut *lean solvent* kemudian dianalisa dengan titrasi *chittic*. Langkah – langkah percobaan dijelaskan dalam diagram alir berikut ini.

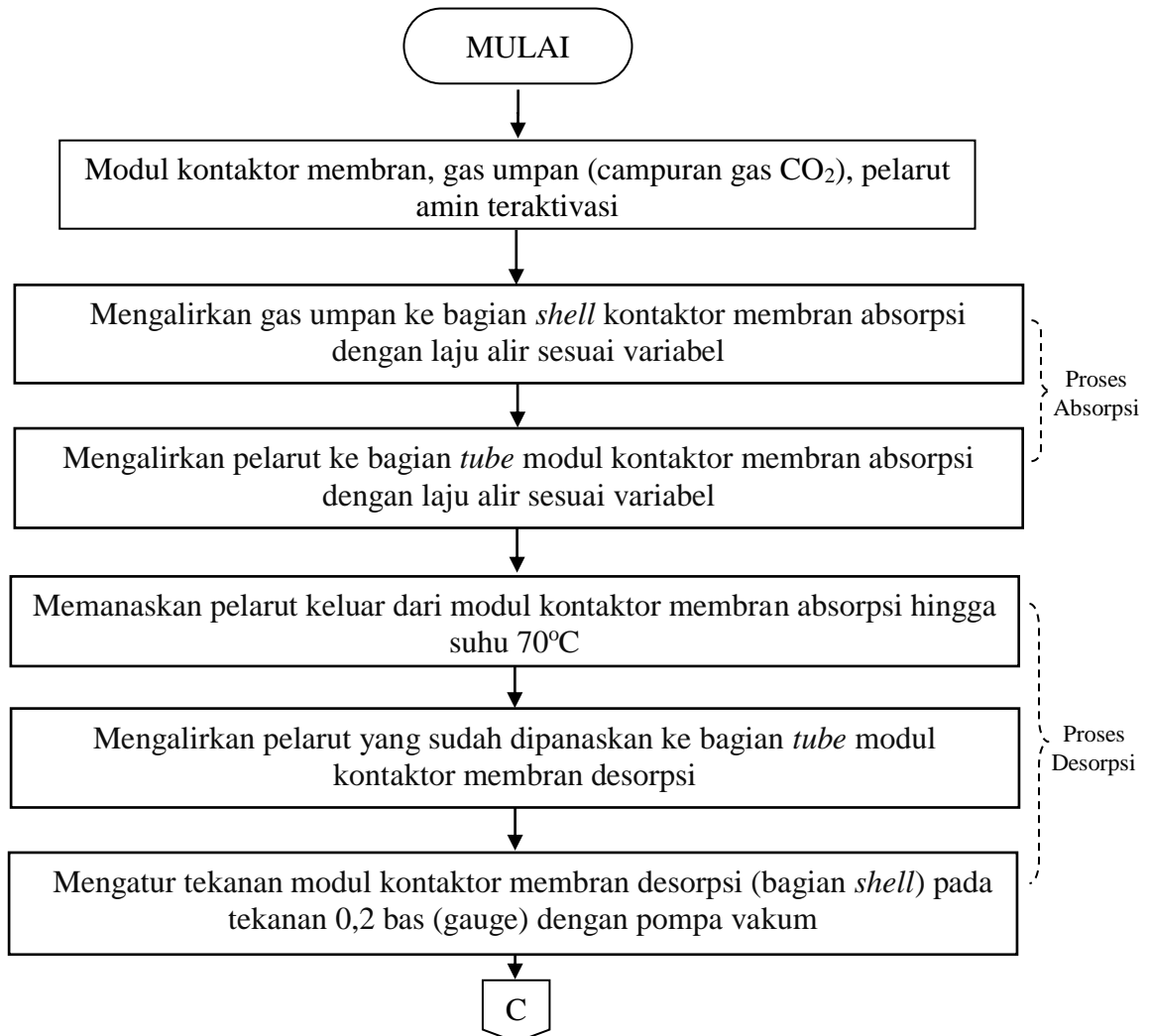




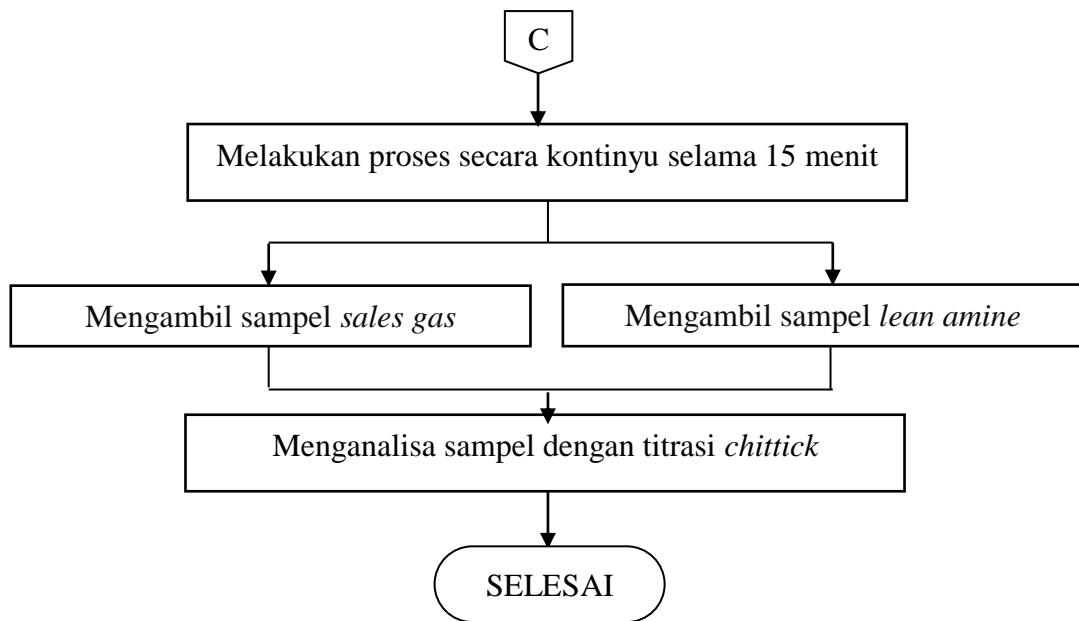
**Gambar 3.5** Diagram alir percobaan proses desorpsi

### 3.5.3 Absorpsi – Desorpsi Simultan

Langkah – langkah percobaan dijelaskan dalam diagram alir berikut ini.







**Gambar 3.6** Diagram alir penelitian absorpsi-desorpsi secara simultan

### 3.6 Analisa Hasil Penelitian

#### 3.6.1 Analisa Fluks Absorpsi – Desorpsi, %CO<sub>2</sub> *removal* Absorpsi, dan % Efisiensi Desorpsi

Hasil analisa konsentrasi gas CO<sub>2</sub> dalam *sales gas* dan pelarut digunakan untuk menghitung fluks absorpsi – desorpsi, %CO<sub>2</sub> *removal* absorpsi, dan %efisiensi desorpsi.

Persamaan fluks absorpsi (Rahim, dkk. 2015) :

$$J_{CO_2} = \frac{(Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out})}{A} \dots\dots\dots(3.1)$$

dimana J<sub>CO<sub>2</sub></sub> adalah fluks absorpsi dalam (mol/m<sup>2</sup>s), Q<sub>in</sub> dan Q<sub>out</sub> adalah aju alir gas CO<sub>2</sub> masuk dan keluar absorber (m<sup>3</sup>/s), C<sub>in</sub> dan C<sub>out</sub> adalah konsentrasi inlet dan outlet dari gas CO<sub>2</sub> (mol/m<sup>3</sup>).

Sedangkan untuk fluks desorpsi (Fang, dkk. 2012)

$$N_{CO_2} = \frac{(Q_R \times \alpha_R \times M_R - Q_L \times \alpha_L \times M_L)}{6 \times 10^4 \times A} \dots\dots\dots(3.2)$$

dimana N<sub>CO<sub>2</sub></sub> adalah fluks desorpsi dalam (mol/m<sup>2</sup>s), α<sub>R</sub> dan α<sub>L</sub> adalah CO<sub>2</sub> loading pada pelarut masuk dan keluar desorber (mol CO<sub>2</sub>/mol pelarut), Q<sub>R</sub>

dan  $Q_L$  adalah laju alir pelarut masuk dan keluar desorber (mL/menit),  $M_R$  dan  $M_L$  adalah konsentrasi pelarut masuk dan keluar desorber (mol/L), dan  $A$  adalah luas kontak gas-liquid ( $m^2$ ). Luas kontak gas-liquid dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$A = 2 \times \pi \times \frac{1}{2} d_i \times L \times \text{jumlah serat membran} \dots \dots \dots (3.3)$$

Persamaan %CO<sub>2</sub> removal absorpsi :

$$\eta = \frac{(Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out})}{Q_{in} \times C_{in}} \times 100\% \dots \dots \dots (3.4)$$

Persamaan % efisiensi desorpsi :

$$\eta = \frac{(Q_R \times \alpha_R \times M_R - Q_L \times \alpha_L \times M_L)}{Q_R \times \alpha_R \times M_R} \times 100\% \dots \dots \dots (3.5)$$

### 3.6.2 Titrasi *chittic*

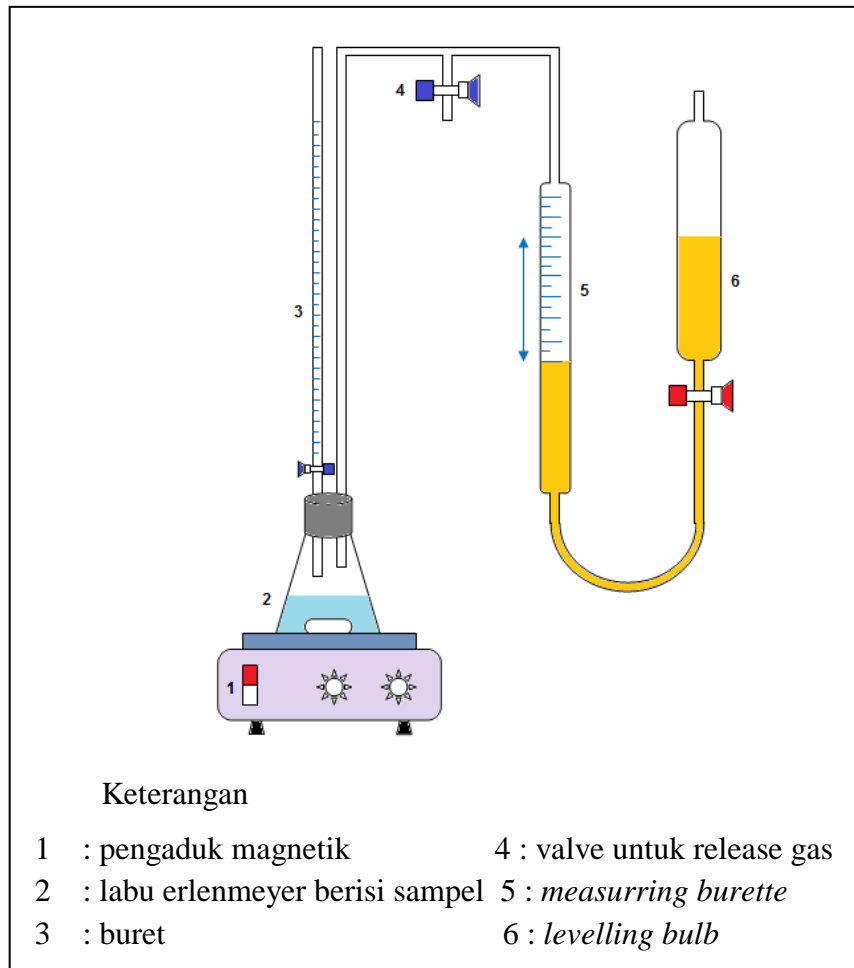
Konsentrasi CO<sub>2</sub> di dalam pelarut ditentukan dengan analisa titrasi chittick, skema alat ditunjukkan oleh **Gambar 3.7**. Labu erlenmeyer berisi sampel pelarut dengan indikator (*methyl orange*) dihubungkan dengan dua saluran. Sambungan pertama dihubungkan dengan buret untuk titrasi dan sambungan kedua dihubungkan dengan U-tube manometer. Sampel pelarut ditrasi dengan larutan HCl (1 M) dari tabung buret hingga warna sampel pelarut berubah dari kuning menjadi merah. CO<sub>2</sub> yang terlepas dari sampel ditangkap oleh larutan garam NaCl jenuh yang ada di *levelling bulb* melalui U-tube. Jumlah CO<sub>2</sub> yang terlepas tersebut dapat diketahui berapa jumlahnya dari perubahan volume yang ditunjukkan oleh *measuring burette*.

Konsentrasi CO<sub>2</sub> di dalam pelarut, biasa disebut dengan CO<sub>2</sub> loading, ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\alpha = \frac{\text{mol}(CO_2)}{\text{mol}(\text{pelarut})} = \left[ \frac{(V_{gas} - V_{HCl})(P)(273K)}{(101325Pa)(T)(22,4L/mol)} \right] \dots \dots \dots (3.6)$$

(Rahim, dkk. 2015)

dimana  $V_{\text{gas}}$  adalah perubahan volume larutan NaCl yang ditunjukkan oleh measuring burette (mL),  $V_{\text{HCl}}$  adalah volume HCl yang diperlukan sampai sampel pelarut berubah warna (mL),  $P$  adalah tekanan atmosfer (Pa),  $T$  adalah suhu ruangan (K),  $C_1$  adalah konsentrasi pelarut (mol/L), dan  $V_1$  adalah volume sampel pelarut (mL).



**Gambar 3.7** Skema alat titrasi chittic

### 3.6.3 Menghitung Koefisien Perpindahan Massa

#### 3.6.3.1 Perhitungan Data Eksperimen

Metode untuk menentukan koefisien perpindahan massa  $\text{CO}_2$  pada kontaktor membran absorpsi maupun desorpsi dapat dihitung berdasarkan analogi perpindahan panas yang diajukan oleh Wilson (1915). Plot grafik Wilson antara  $1/K_{\text{OL}}$  dan  $1/Re$  yang dihitung pada setiap percobaan. Dimana

$K_{OL}$  adalah koefisien perpindahan massa total dan  $Re$  adalah bilangan Reynold untuk setiap laju alir pelarut.

$K_{OL}$  dapat dihitung dengan persamaan (Fang, dkk. 2012) :

$$K_{OL} = \frac{N_{CO_2}}{\Delta C_{CO_2}} \dots\dots\dots (3.7)$$

dimana  $N_{CO_2}$  adalah fluks desorpsi dan  $\Delta C_{CO_2}$  adalah konsentrasi  $CO_2$  rata – rata logaritmik.

$$\Delta C_{CO_2} = \frac{(C_{in} - C_{in}^*) - (C_{out} - C_{out}^*)}{\ln \left[ \frac{C_{in} - C_{in}^*}{C_{out} - C_{out}^*} \right]} \dots\dots\dots (3.8)$$

dimana  $C_{in}$  dan  $C_{out}$  adalah konsentrasi  $CO_2$  masuk dan keluar modul kontaktor (mol/L),  $C_{in}^*$  dan  $C_{out}^*$  adalah konsentrasi  $CO_2$  pada saat kesetimbangan, yaitu :

$$C_{in}^* = C_{g,in} \times H \dots\dots\dots (3.9)$$

$$C_{out}^* = C_{g,out} \times H \dots\dots\dots (3.10)$$

Pada penelitian ini, tekanan parsial  $CO_2$  diasumsi sangat kecil, sehingga  $C_{g,in}$  dan  $C_{g,out}$  menjadi sangat kecil dan  $C_{in}^*$  dan  $C_{out}^*$  bernilai nol.

Untuk bilangan *Reynold* pada aliran dalam pipa adalah sebagai berikut :

$$N_{Re} = \frac{\rho \times d \times v}{\mu} \dots\dots\dots (3.11)$$

dimana  $\rho$  adalah massa jenis pelarut ( $g/cm^3$ ),  $d$  adalah diameter membran *hollow fiber* (m),  $v$  adalah kecepatan pelarut (m/s), dan  $\mu$  adalah viskositas dinamik pelarut (Pa.s).

Metode yang telah banyak digunakan untuk menentukan koefisien perpindahan massa berdasarkan percobaan diusulkan oleh Wilson. Berdasarkan analogi perpindahan panas yang diusulkan oleh Wilson, hambatan individu dapat ditentukan tergantung dari nilai hambatan total pada kecepatan liquid. Hal ini berlaku pada sistem *steady state* dimana satu-satunya variabel adalah kecepatan fluida. Perhitungan terdiri dari dua langkah, yaitu menghitung koefisien perpindahan massa total untuk setiap percobaan dan kemudian plot grafik hambatan perpindahan massa total sebagai fungsi dari invers bilangan Reynolds.

**Gambar 3.8** adalah contoh Plot Wilson dari penelitian Fang, dkk pada tahun 2012 tentang desorpsi CO<sub>2</sub> dengan metode kontaktor membran vakum dari pelarut monoethanolamina dan membran yang digunakan adalah polipropilena.

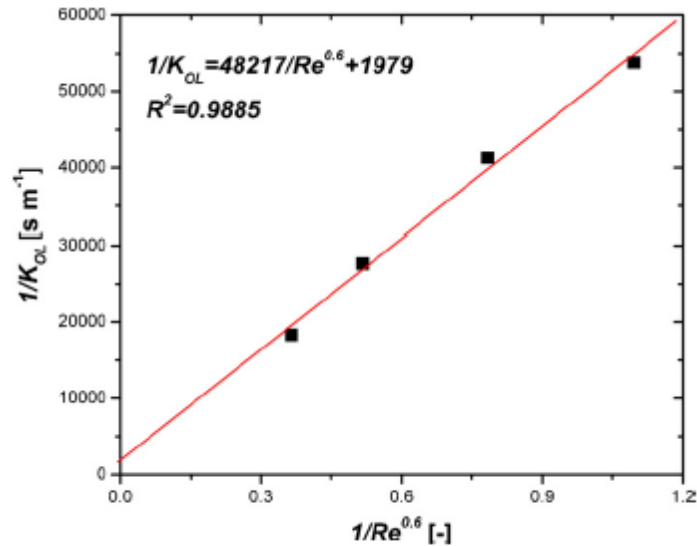


Fig. 4. Wilson plot for mode B.

**Gambar 3.8** Contoh Plot Wilson dari penelitian Fang,dkk. 2012

Nilai eksponen  $z$  pada  $1/Re$  dipilih 0,8 dipilih untuk mencapai regresi linier terbaik pada garis menurut metode kuadrat terkecil dan sebanding dengan eksponen yang digunakan dalam beberapa literatur yang berkisar antara 0,6 – 0,9. (Franco, J. dkk. 2010).

Karena hambatan pada fase gas dan membran bukan merupakan fungsi dari kecepatan cairan, maka total hambatan pada fase gas dan hambatan membran merupakan intersep dari plot Wilson. Seperti yang dijelaskan dengan persamaan berikut ini :

$$\frac{1}{K_{OL}} = \underbrace{slope}_{\frac{1}{k_L}} \times \frac{1}{Re^{0.8}} + \underbrace{intercept}_{\frac{1}{k_G} + \frac{1}{k_M}} \dots \dots \dots (3.12)$$

### 3.6.3.2 Perhitungan Empiris

Koefisien perpindahan massa total dihitung dari persamaan 2.2:

$$\frac{1}{K_{OL}} = \frac{1}{k_L E} + \frac{d_i}{k_M H d_m} + \frac{d_i}{k_G H d_o}$$

Koefisien perpindahan massa total tersebut terdiri dari koefisien perpindahan massa individu yaitu di bagian fasa gas (1/kG), membran (1/kM), dan fasa cairan (1/kL). Persamaan korelasi untuk memprediksi koefisien perpindahan massa merupakan model matematik yang dapat diprediksi dari persamaan korelasi empirik seperti persamaan 2.4 :

$$Sh = a Re^\alpha Sc^\beta$$

Korelasi empirik sangat diperlukan untuk menggambarkan kinerja perpindahan massa dalam merancang kontaktor membran. Sh, Re, Sc berturut – turut adalah bilangan *Sherwood*, bilangan *Reynold*, dan bilangan *Schmidt*, dimana harga a dan  $\alpha$  ditentukan dari hasil percobaan.

Koefisien perpindahan massa di bagian liquid ( $k_L$ ) dapat ditentukan dari hubungan bilangan Sherwood (persamaan 2.5) :

$$Sh = \frac{k_L d_h}{D_l}$$

dimana  $D_l$  adalah koefisien difusi dari gas ke dalam cairan ( $m^2/det$ ) dan  $d_h$  adalah diameter hidraulik kontaktor membran (m).

Koefisien perpindahan massa di bagian membran ( $k_M$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan yang disimpulkan oleh Hukum Ficks dengan asumsi tidak ada pembasahan pada membran :

$$\frac{1}{k_M} = \frac{\tau \delta}{D_{g,eff} \epsilon} \dots\dots\dots (3.13)$$

dimana  $\delta$  adalah ketebalan membran (m),  $\epsilon$  adalah porositas membran (0,65),  $\tau$  adalah turtositas ( $\tau = 1/ \epsilon^2$ ), dan  $D_{g,eff}$  adalah koefisien difusivitas efektif dari gas ke dalam pori membran yang tidak terbasahi yang ditentukan oleh interaksi antara difusi molekular dan interaksi molekul dengan dinding pori membran (difusi Knudsen) yang ditunjukkan dengan persamaan 2.11 :

$$\frac{1}{D_{g,eff}} = \frac{1}{D_{g,m}} + \frac{1}{D_{g,kn}}$$

$D_{g,m}$  dihitung dengan persamaan (2.13) dan  $D_{g,kn}$  dihitung dengan persamaan (2.14), yaitu sebagai berikut :

$$D_{g,m} = \frac{4,36 \times 10^{-5} T^{1,5} \left( \frac{1}{M_{CO_2}} + \frac{1}{M_{CO_2}} \right)^{0,5}}{D_{g,kn} \left( \frac{P}{P_{CO_2}} \right)^{1/3}}$$

Untuk pori membran yang sebagian terisi oleh cairan, maka koefisien perpindahan massa di bagian membran dihitung dengan persamaan berikut :

$$\frac{1}{k_m} = \frac{\tau \delta \beta}{D_{CO_2,L} \epsilon} + \frac{(1-\beta) \tau \delta}{D_{g,eff} \epsilon} \dots\dots\dots(3.14)$$

Dimana  $\beta$  adalah fraksi cairan yang masuk pori dan  $D_{CO_2,L}$  adalah koefisien difusi dari CO<sub>2</sub> ke dalam liquid.

Sedangkan untuk koefisien perpindahan massa di bagian gas ( $k_G$ ) dapat ditentukan dari literatur, karena nilainya yang sangat kecil hampir tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap koefisien perpindahan massa total.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN



## **BAB 4**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Absorpsi dan desorpsi gas CO<sub>2</sub> dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan kontaktor membran serat berongga polipropilena. Penelitian ini menggabungkan metode absorpsi-desorpsi Rahim

menggunakan pelarut dan teknologi membran. Pelarut yang digunakan dalam penelitian ini adalah diethanolamina (DEA) dan methyl diethanolamina (MDEA) dengan penambahan aktivator untuk masing-masing DEA dan MDEA. Aktivator yang digunakan adalah piperazine (PZ), arginin, dan mono sodium glutamate (MSG).

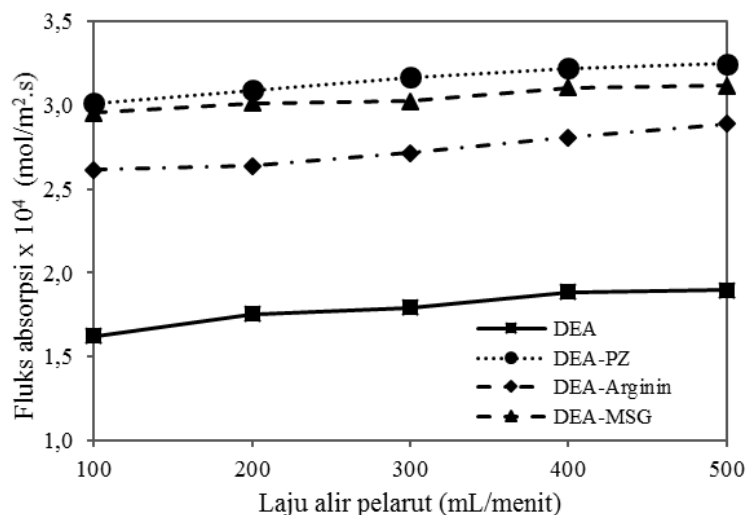
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pelarut yang efektif berdasarkan nilai laju perpindahan massa (fluks) dan efisiensi CO<sub>2</sub> *removal*. Dari ketiga aktivator yang digunakan akan diketahui aktivator yang paling efektif untuk proses absorpsi dan desorpsi. Selain itu, variasi laju alir pelarut pada penelitian ini digunakan untuk menghitung nilai koefisien perpindahan massa total pada proses desorpsi CO<sub>2</sub>.

#### **4.1 Absorpsi**

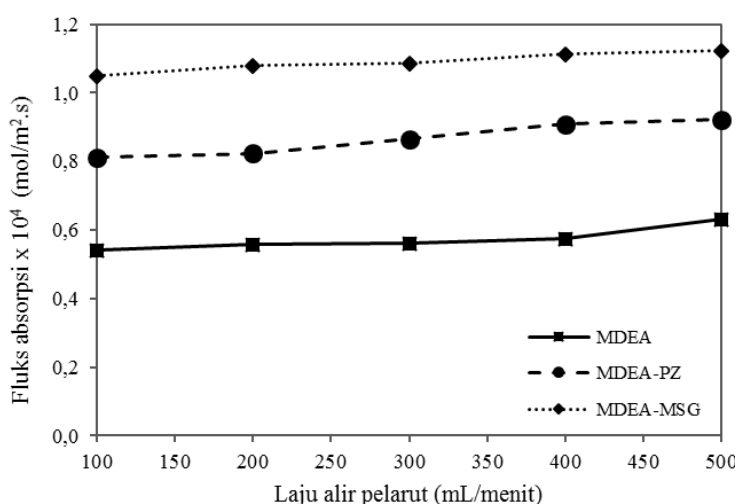
Proses absorpsi merupakan proses pemisahan gas CO<sub>2</sub> dengan menggunakan pelarut sebagai penangkap gas CO<sub>2</sub>. Penelitian dilakukan dengan mengalirkan gas CO<sub>2</sub> dengan konsentrasi 40% volume ke dalam modul membran dengan laju alir 600 mL/menit dan mengalirkan pelarut dengan variasi laju alir 100, 200, 300, 400, dan 500 mL/menit. Proses absorpsi berjalan selama 15 menit, dimana sistem sudah *steady state*. Pengambilan sampel *rich solvent* langsung dilakukan setelah proses 15 menit berakhir, sedangkan pengambilan sampel *sales gas* dilakukan dengan *bubbling sales gas* ke dalam larutan NaOH selama 10 menit untuk kemudian dianalisa dengan titrasi *chittic*.

#### 4.1.1 Pengaruh Laju Alir Pelarut terhadap Fluks Absorpsi

Pengaruh laju alir pelarut terhadap fluks absorpsi CO<sub>2</sub> semakin tinggi dengan meningkatnya laju alir pelarut. Seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.1** untuk pelarut DEA dan **Gambar 4.2** untuk pelarut MDEA.



**Gambar 4.1** Pengaruh laju alir pelarut DEA terhadap fluks absorpsi pada berbagai jenis pelarut ( $T_{\text{operasi}} = 31^{\circ}\text{C}$  ;  $P_{\text{operasi}} = 1,5$  bar (abs) ;  $Q_{\text{gas,in}} = 600$  mL/menit ;  $C_{\text{CO}_2,\text{in}} = 40\%$  vol)



**Gambar 4.2** Pengaruh laju alir pelarut MDEA terhadap fluks absorpsi pada berbagai jenis pelarut ( $T_{\text{operasi}} = 31^{\circ}\text{C}$  ;  $P_{\text{operasi}} = 1,5$  bar (abs) ;  $Q_{\text{gas,in}} = 600$  mL/menit ;  $C_{\text{CO}_2,\text{in}} = 40\%$  vol)

**Gambar 4.1** dan **Gambar 4.2** menunjukkan bahwa semakin cepat laju alir pelarut memberikan pengaruh yang berbanding lurus dengan fluks absorpsi. Sehingga nilai fluks absorpsi tertinggi untuk masing – masing jenis pelarut adalah

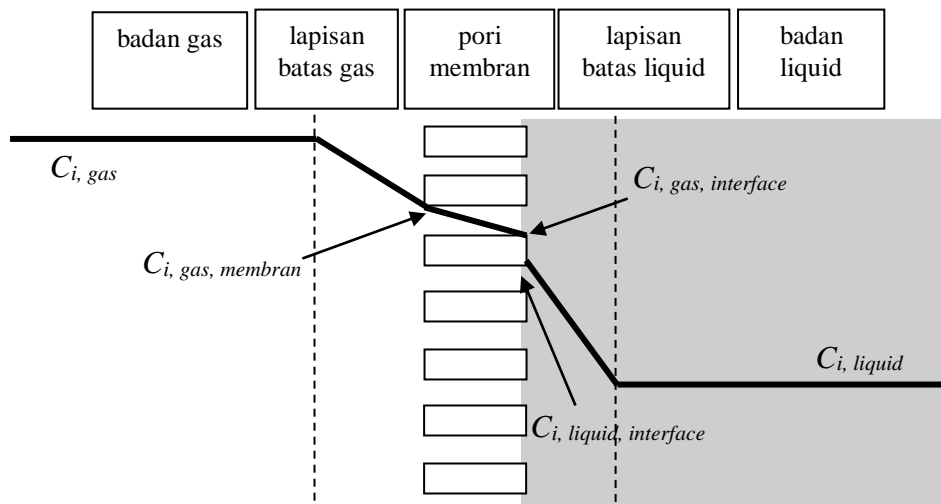
laju alir pelarut tertinggi, yaitu pada 500 mL/menit. Laju alir pelarut yang lebih besar menyebabkan konsentrasi CO<sub>2</sub> di dalam pelarut semakin kecil, karena aliran pelarut akan semakin cepat digantikan dengan pelarut yang *fresh*, sehingga gradien konsentrasi CO<sub>2</sub> dalam fase gas dan liquid juga semakin besar.

Zhang, dkk. (2014) dalam *review*-nya tentang absorpsi CO<sub>2</sub> dari *flue gas* menggunakan modul membran serat berongga, mengatakan bahwa pada laju alir gas umpan dan diameter membran yang konstan, laju alir pelarut yang semakin cepat akan mengurangi lapisan batas pada fase cair dan mengurangi hambatan perpindahan massa pada fase liquid. Beberapa penelitian tentang pengaruh laju alir pelarut terhadap fluks absorpsi juga telah dilakukan, seperti Lv, dkk. (2012) yang melakukan penelitian pemisahan gas SO<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> dari gas hasil pembakaran batu bara menggunakan membran serat berongga polipropilena dan MEA sebagai pelarut. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa semakin bertambahnya laju alir pelarut akan meningkatkan kecepatan difusi gas ke dalam liquid, sehingga dapat meningkatkan fluks absorpsi.

Rahim, dkk. (2015) melakukan penelitian absorpsi CO<sub>2</sub> dari gas alam dengan empat jenis larutan garam asam amino sebagai pelarut dan dibandingkan dengan larutan MEA dan NaOH dengan menggunakan modul kontaktor membran serat berongga yang terbuat dari PVDF. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa laju alir pelarut memberikan pengaruh yang signifikan dengan fluks absorpsi. Untuk semua jenis pelarut, fluks absorpsi meningkat dengan semakin bertambahnya laju alir pelarut. Hal ini dapat disebabkan oleh ketebalan lapisan batas dan hambatan perpindahan massa di fase liquid yang berkurang dengan bertambahnya laju alir liquid. Hasil yang sama juga ditunjukkan oleh beberapa ilmuwan seperti Rangwala, dkk. (1996) ; Kim dan Yang, dkk. (2000) ; Atchariyawut, dkk. (2006) ; Mansourizadeh, dkk. (2010).

Nilai fluks absorpsi menunjukkan seberapa cepat perpindahan massa CO<sub>2</sub> dari gas ke dalam pelarut. Pada proses absorpsi, gas umpan yang mengandung banyak CO<sub>2</sub> mengalir pada bagian *shell* modul membran, kemudian berdifusi ke dalam pelarut melalui pori – pori membran. Pada keadaan membran hidrofobik yang tidak terbasahi (*non wetting*), gas akan memenuhi pori pori membran untuk memperkecil hambatan di bagian membran. Proses perpindahan massa CO<sub>2</sub>

ditunjukkan oleh **Gambar 4.3** melalui tiga tahap : (1) difusi komponen gas  $i$  ( $i = \text{CO}_2$ ) dari fase badan gas menuju permukaan terluar membran (2) difusi melalui pori membran ke bagian *interface* gas-liquid; dan (3) larutnya  $\text{CO}_2$  ke dalam lapisan liquid dan kemudian dapat terjadi reaksi kimia atau difusi ke dalam fase liquid, dan pada akhirnya larut ke dalam badan liquid.



**Gambar 4.3** Profil konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  pada perpindahan massa gas  $\text{CO}_2$  dari fasa gas ke fasa cairan dengan kondisi membran tidak terbasahi

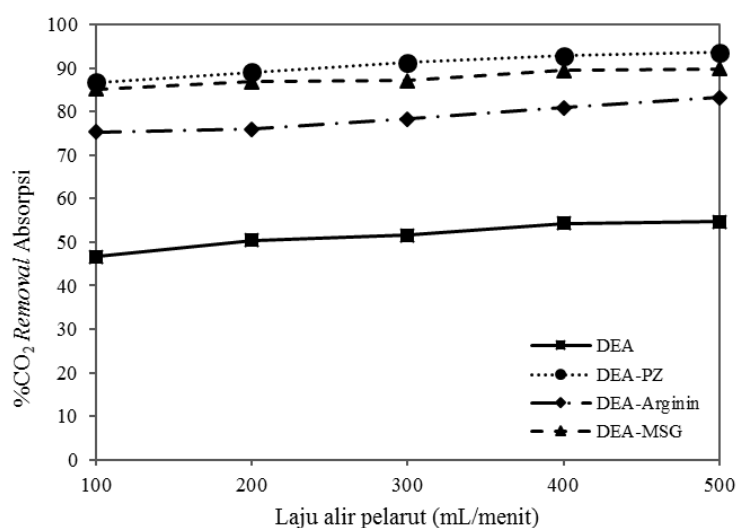
Nilai fluks absorpsi tertinggi dari DEA tanpa aktivator, DEA-PZ, DEA-Arginin, dan DEA-MSG pada laju alir pelarut 500 mL/menit secara berurutan adalah 1,897 mol/  $\text{m}^2\text{s}$  ;  $3,2488 \times 10^{-4}$  mol/  $\text{m}^2\text{s}$  ; 2,8887 mol/  $\text{m}^2\text{s}$  ; dan 3,1174 mol/  $\text{m}^2\text{s}$ . Sedangkan untuk nilai fluks absorpsi tertinggi dari MDEA tanpa aktivator, MDEA-PZ, dan MDEA-MSG pada laju alir pelarut 500 mL/menit secara berurutan adalah 0,6303 mol/  $\text{m}^2\text{s}$  ; 0,9218 mol/  $\text{m}^2\text{s}$  ; dan 1,1235 mol/  $\text{m}^2\text{s}$ .

Berdasarkan hasil tersebut, menunjukkan bahwa pelarut DEA memberikan hasil lebih baik dibandingkan pelarut MDEA dan aktivator memberikan pengaruh positif untuk meningkatkan fluks absorpsi.

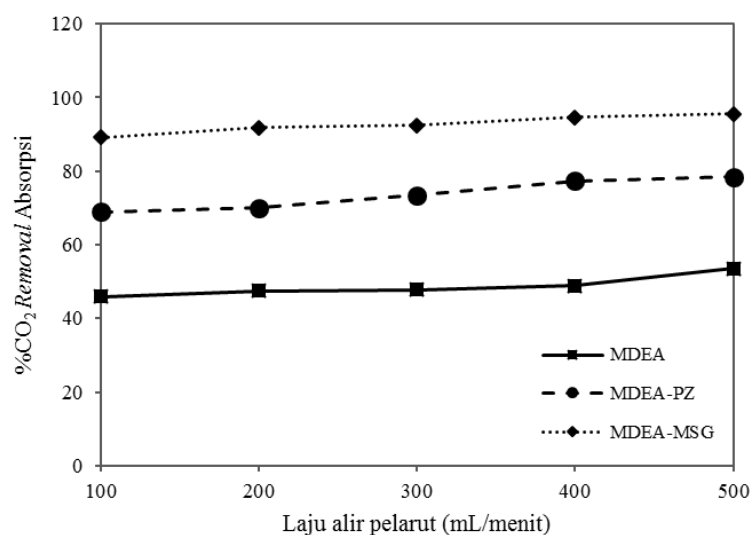
#### 4.1.2 Pengaruh Laju Alir Pelarut terhadap % $\text{CO}_2$ Removal Absorpsi

Pengaruh laju alir pelarut terhadap % $\text{CO}_2$  removal absorpsi ditunjukkan oleh **Gambar 4.4** dan **Gambar 4.5**. Pada konsentrasi dan laju alir gas umpan

yang sama, hasil menunjukkan kecenderungan %CO<sub>2</sub> removal absorpsi yang meningkat seiring bertambahnya laju alir pelarut.



**Gambar 4.4** Pengaruh laju alir pelarut DEA terhadap %CO<sub>2</sub> removal absorpsi pada berbagai jenis pelarut ( $T_{\text{operasi}} = 31^{\circ}\text{C}$  ;  $P_{\text{operasi}} = 1,5$  bar (abs) ;  $Q_{\text{gas,in}} = 600$  mL/menit ;  $C_{\text{CO}_2,\text{in}} = 40\%$  vol)



**Gambar 4.5** Pengaruh laju alir pelarut MDEA terhadap %CO<sub>2</sub> removal absorpsi pada berbagai jenis pelarut ( $T_{\text{operasi}} = 31^{\circ}\text{C}$  ;  $P_{\text{operasi}} = 1,5$  bar (abs) ;  $Q_{\text{gas,in}} = 600$  mL/menit ;  $C_{\text{CO}_2,\text{in}} = 40\%$  vol)

**Gambar 4.4** dan **Gambar 4.5** menunjukkan kecenderungan yang sama dengan pengaruh laju alir pelarut terhadap fluks absorpsi. Meningkatnya %CO<sub>2</sub> removal absorpsi berhubungan dengan besarnya fluks absorpsi, dimana semakin

besar fluks absorpsi menunjukkan seberapa cepat perpindahan massa CO<sub>2</sub> dari fase gas ke dalam liquid. Fluks dapat didefinisikan sebagai banyaknya CO<sub>2</sub> yang berpindah persatuan waktu per satuan luas membran. Maka, semakin besar laju alir pelarut akan memperbesar gradien konsentrasi CO<sub>2</sub> dalam fase gas dan liquid, sehingga mempercepat transfer massa CO<sub>2</sub>. Hasil ini sama dengan hasil penelitian beberapa ilmuwan, seperti penelitian Lv, dkk. (2012) ; Rahim, dkk. (2015) ; Rangwala, dkk. (1996) ; Kim dan Yang, dkk. (2000) ; Atchariyawut, dkk. (2006) ; Mansourizadeh, dkk. (2010).

Nilai %CO<sub>2</sub> *removal* absorpsi tertinggi untuk pelarut DEA tanpa aktivator, DEA-PZ, DEA-Arginin, dan DEA-MSG pada laju alir pelarut 500 mL/menit adalah 54,638% ; 93,574% ; 83,202%, dan 89.79%. Maka, penggunaan pelarut DEA-PZ 1,7 kali lebih baik dibandingkan jika menggunakan pelarut DEA tanpa aktivator.

Sedangkan %CO<sub>2</sub> *removal* absorpsi tertinggi dari pelarut MDEA tanpa aktivator, MDEA-PZ dan MDEA-MSG pada laju alir pelarut 500 mL/menit adalah 53,602% ,78,397% dan 95,554%. Maka, penggunaan pelarut MDEA-MSG 1,8 kali lebih baik dibandingkan jika menggunakan pelarut MDEA tanpa aktivator.

#### **4.1.3 Pengaruh Jenis Pelarut dan Penambahan Aktivator pada Proses Absorpsi**

Pelarut yang paling banyak digunakan untuk absorpsi CO<sub>2</sub> di industri yaitu pelarut alkanolamina karena keunggulannya dalam hal teknis proses absorpsi, segi komersial, dan fleksibilitas untuk aliran gas dengan tekanan parsial CO<sub>2</sub> rendah. Beberapa jenis alkanolamina yang umum digunakan adalah amina primer : monoetanolamina (MEA), sekunder : dietanolamina (DEA), dan tersier : metildietanolamina (MDEA).

Amina primer dan sekunder memiliki laju reaksi yang lebih cepat dibandingkan dengan amina tersier. Namun, amina tersier memiliki kapasitas CO<sub>2</sub> yang lebih besar dibandingkan amina primer dan sekunder. Dari hasil penelitian, nilai fluks absorpsi maupun %CO<sub>2</sub> *removal* dari DEA memberikan hasil yang lebih tinggi dibandingkan MDEA. Hal ini dapat disebabkan oleh efek basa dari

DEA dan MDEA, bahwa pH dari DEA lebih basa sehingga dapat membentuk karbamat yang lebih stabil, sedangkan reaksi antara MDEA dan CO<sub>2</sub> kurang stabil karena pH yang cenderung lebih asam.

Dalam penelitian ini, DEA dan MDEA ditambahkan dengan beberapa jenis aktivator untuk meningkatkan kemampuannya dalam absorpsi CO<sub>2</sub>. Penambahan aktivator dilakukan berdasarkan prinsip untuk saling menggabungkan kelebihan dari aktivator dan menekan kelemahan dari pelarut DEA atau MDEA.

Pengaruh adanya aktivator di dalam pelarut DEA dan MDEA memberikan hasil yang signifikan, dimana pelarut yang teraktivasi menghasilkan fluks absorpsi dan %CO<sub>2</sub> *removal* absorpsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan pelarut tanpa aktivator. Dari ketiga aktivator yang digunakan, aktivator PZ memberikan hasil terbaik untuk pelarut DEA dan aktivator MSG memberikan hasil terbaik untuk pelarut MDEA.

Kelebihan aktivator PZ dibandingkan dengan aktivator lain adalah pada tahapan reaksi antara PZ dengan CO<sub>2</sub> tanpa melalui reaksi intermediet. Hal ini bisa terjadi karena PZ memiliki struktur molekul khusus dimana terdapat struktur siklik diamino simetris yang mengkatalisis reaksi hidrolisis CO<sub>2</sub> dalam karbamat menjadi ion bikarbonat (Lu, J.G., dkk. 2007).

Jika tanpa aktivator, reaksi antara DEA dan CO<sub>2</sub> adalah sebagai berikut :



Dalam reaksi (IV.1) proses pembentukan karbamat terjadi dalam dua tahapan yaitu :

- Pembentukan *zwitterion* sebagai produk antara (*intermediate*)  

$$\text{CO}_2 + \text{DEA} \leftrightarrow \text{DEAH}^+\text{COO}^- \dots\dots\dots (\text{IV.2})$$
- Penghilangan proton oleh basa B  

$$\text{DEAH}^+\text{COO}^- + \text{B} \leftrightarrow \text{DEACOO}^- + \text{BH}^+ \dots\dots\dots (\text{IV.3})$$

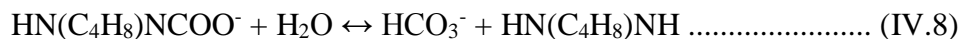
Dimana basa B bisa berupa amin itu sendiri, molekul air atau ion hidroksil yang bereaksi dalam larutan DEA :



Sedangkan jika terdapat aktivator PZ, akan memberikan perbedaan reaksi dimana PZ akan langsung membentuk ion karbamat tanpa harus melalui reaksi *intermediet*, seperti ditunjukkan pada reaksi (IV.7) berikut ini :

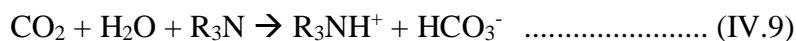


Kemudian karbamat akan mengubah  $\text{CO}_2$  menjadi ion bikarbonat dan PZ akan ter-regenerasi.



Hasil yang berbeda pada pelarut MDEA adalah bahwa aktivator MSG memberikan hasil lebih baik dibandingkan aktivator PZ.

Amina tersier berbeda dari amina primer dan sekunder dalam perilaku mereka terhadap  $\text{CO}_2$ , karena  $\text{CO}_2$  tidak dapat bereaksi secara langsung dengan gugus amina tersier. Hal ini yang menyebabkan laju reaksi yang lebih lambat untuk reaksi  $\text{CO}_2$  dengan amina tersier dibandingkan dengan amina primer dan sekunder. Mekanisme reaksi keseluruhan antara  $\text{CO}_2$  dan MDEA adalah :

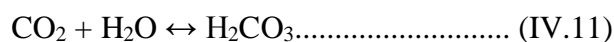


Dimana reaksi di atas melalui beberapa tahapan sebagai berikut :

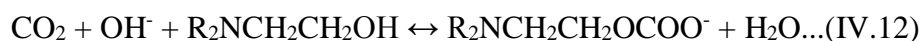
(a) pembentukan bikarbonat :



(b) pembentukan asam karbonat :

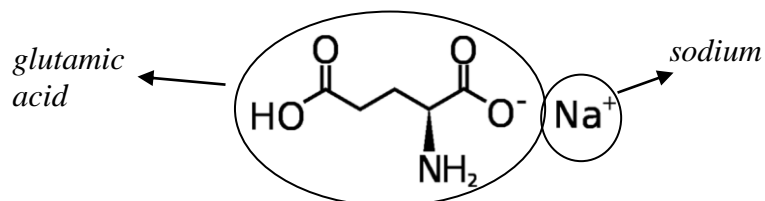


(c) pembentukan alkil karbonat :



Pada prinsipnya, setiap reaksi (IV.9) s/d (IV.11) berkontribusi terhadap laju reaksi keseluruhan yang diukur.

*Monosodium glutamate* merupakan garam – garam asam amino yang terdiri dari *sodium* dan *glutamic acid*, seperti ditunjukkan oleh **Gambar 4.6** di bawah ini.



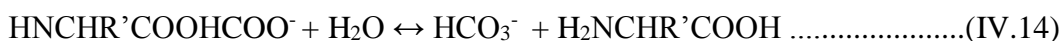
**Gambar 4.6** Struktur kimia MSG yang terdiri dari *sodium* dan *glutamic acid*



Beberapa penelitian tentang absorpsi gas CO<sub>2</sub> mulai menggunakan pelarut dari garam asam amino karena memberikan beberapa keuntungan, yaitu reaksi kinetik yang cepat dan tinggi terhadap CO<sub>2</sub>, volatilitas rendah, rate korosi rendah dan ketahanan degradasi oksidasi yang tinggi (Ningsih,E., dkk. 2017).

Pada penelitian Rahim, dkk (2015) tentang pemisahan gas CO<sub>2</sub> dari gas alam menggunakan beberapa pelarut garam asam amino menunjukkan hasil bahwa pelarut garam asam amino memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan pelarut MEA. Garam asam amino memiliki kelompok gugus fungsional yang sama dengan alkanolamina, namun larutan garam asam amino memiliki tegangan permukaan yang tinggi dan viskositas yang rendah sehingga hal ini membuatnya lebih potensial untuk digunakan sebagai pelarut dalam absorpsi gas CO<sub>2</sub> menggunakan kontaktor membran (Rahim, dkk.2015).

Struktur asam amino secara umum adalah satu atom C yang mengikat empat gugus, yaitu gugus amina (NH<sub>2</sub>), gugus karboksil (COOH), atom hidrogen (H), dan satu gugus sisa (R, dari residue) atau disebut juga gugus atau rantai samping yang membedakan satu asam amino dengan asam amino lainnya. Arginin dan MSG merupakan garam asam amino yang mekanisme reaksinya dengan CO<sub>2</sub> dapat dikatakan sama, yaitu melalui tahapan reaksi *intermediate* sebelum membentuk ion karbamat, seperti dijelaskan dalam reaksi berikut ini :



Pada reaksi (IV.12) garam asam amino bereaksi dengan CO<sub>2</sub> membentuk *zwitterion* sebagai produk *intermediate*, kemudian pada reaksi (IV.13) *zwitterion* akan bereaksi dengan basa B untuk melepaskan proton dan membentuk ion karbamat. Setelah terjadi pelepasan proton, pada reaksi (IV.14) ion karbamat akan bereaksi dengan molekul air membentuk ion bikarbonat dan aktivator garam asam amino akan ter-regenerasi.

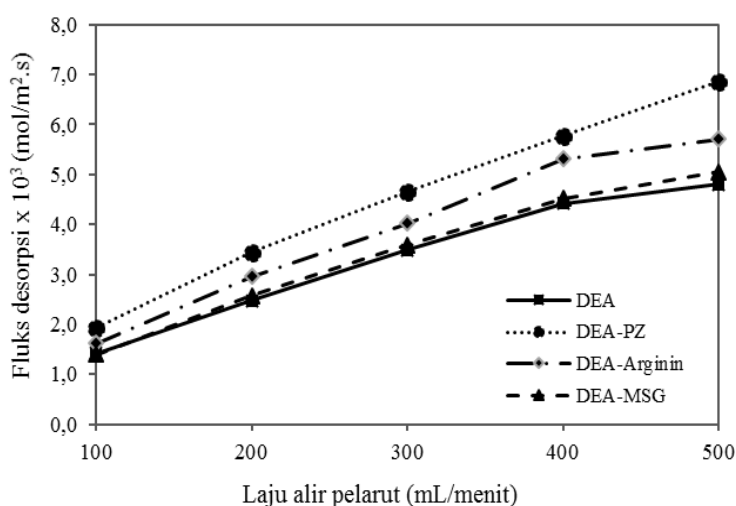
## 4.2 Desorpsi

Proses desorpsi merupakan proses lepasnya gas CO<sub>2</sub> terikat di dalam pelarut yang bertujuan untuk meregenerasi pelarut sehingga dapat digunakan kembali sebagai pelarut yang dapat mengikat CO<sub>2</sub> dalam proses absorpsi. Secara umum, faktor yang mempengaruhi desorpsi adalah suhu dan tekanan operasi. Suhu yang tinggi akan menurunkan kelarutan CO<sub>2</sub> dan tekanan rendah akan meningkatkan tekanan parsial CO<sub>2</sub> di dalam pelarut sehingga CO<sub>2</sub> akan mudah terlepas.

Penelitian dilakukan dengan mengalirkan pelarut yang kaya akan CO<sub>2</sub> ke dalam modul kontaktor membran pada suhu 70°C dengan variasi laju alir pelarut 100, 200, 300, 400, dan 500 mL/menit dimana CO<sub>2</sub> loading untuk pelarut masuk desorber adalah 0,24 mol CO<sub>2</sub>/mol pelarut dan dilakukan pada tekanan vakum 0,2 bar (gauge). Proses desorpsi berlangsung selama 15 menit, dimana sistem *steady state*.

### 4.2.1 Pengaruh Laju Alir Pelarut terhadap Fluks Desorpsi

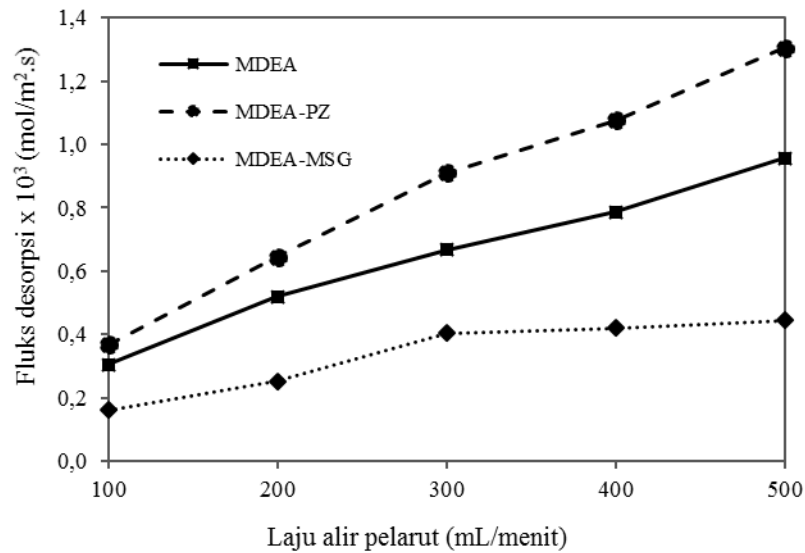
Pengaruh laju alir pelarut terhadap fluks desorpsi CO<sub>2</sub> semakin meningkat dengan meningkatnya laju alir pelarut. Seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.7** dan **Gambar 4.8**.



**Gambar 4.7** Pengaruh laju alir pelarut terhadap fluks desorpsi pada berbagai jenis pelarut DEA ( $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$  dan  $P_{\text{vakum}} = 0,2$  bar (gauge) )

**Gambar 4.7** dan **Gambar 4.8** menunjukkan bahwa pelarut DEA dan MDEA dengan penambahan aktivator memberikan nilai fluks desorpsi lebih tinggi dibandingkan dengan DEA dan MDEA tanpa aktivator.

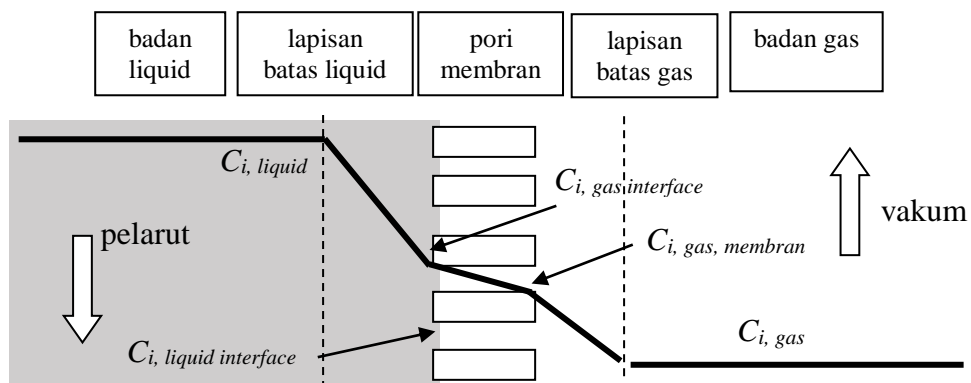
Fluks desorpsi tertinggi untuk pelarut DEA tanpa aktivator dan DEA dengan penambahan aktivator adalah pada laju alir 500 mL/menit. Nilai fluks desorpsi untuk DEA tanpa aktivator, DEA-PZ, DEA-Arginin, dan DEA-MSG adalah  $4,8029 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^2.\text{s}$  ;  $6,8631 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^2.\text{s}$  ;  $5,7039 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^2.\text{s}$  ; dan  $5,0511 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^2.\text{s}$ .



**Gambar 4.8** Pengaruh laju alir pelarut terhadap fluks desorpsi pada berbagai jenis pelarut MDEA ( $T_{\text{pelarut}} = 70^\circ\text{C}$  dan  $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar (gauge)}$  )

Sedangkan untuk nilai fluks desorpsi tertinggi dari MDEA tanpa aktivator, MDEA-PZ, dan MDEA-MSG pada laju alir pelarut 500 mL/menit adalah  $0,9572 \times 10^{-3} \text{ mol/ m}^2.\text{s}$  ;  $1,3051 \times 10^{-3} \text{ mol/ m}^2.\text{s}$  ; dan  $0,4437 \times 10^{-3} \text{ mol/ m}^2.\text{s}$ .

Profil konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  pada saat terjadinya desorpsi menggunakan teknologi regenerasi vakum diilustrasikan pada **Gambar 4.9**.



**Gambar 4.9** Profil konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  pada perpindahan massa gas  $\text{CO}_2$  dari fasa cairan ke fasa gas dengan bantuan vakum

Perpindahan massa CO<sub>2</sub> terjadi dari sisi fasa cairan yang berada dalam *tube* kontaktor membran desorpsi ke sisi fasa gas pada bagian *shell* kontaktor membran desorpsi. Jika pori membran hidrofobik dan tidak terbasahi maka diasumsikan pori membran hanya diisi penuh oleh gas. Difusi CO<sub>2</sub> berawal dari fasa *bulk* cairan pelarut diikuti oleh difusi lapisan batas cairan dan atau reaksi kimia pada permukaan cairan-membran, difusi gas dalam pori membran terhadap dinding membran dan terakhir difusi terhadap fasa *bulk* gas (Fang, dkk. 2012).

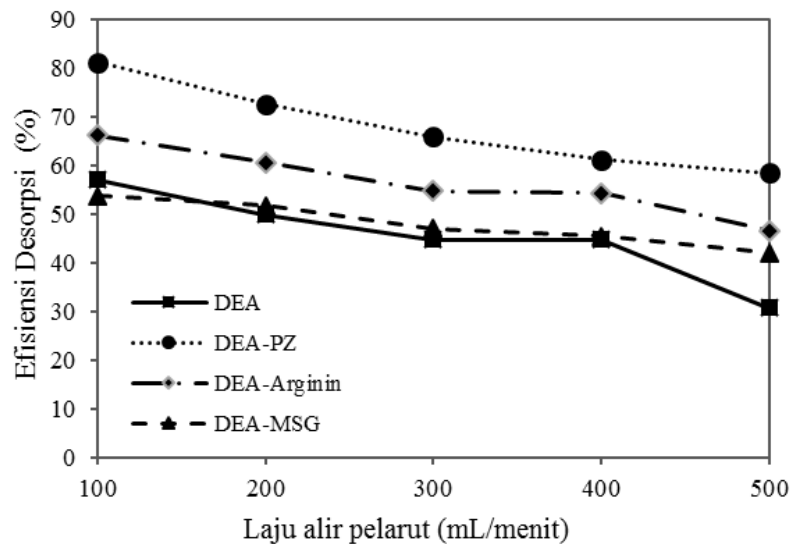
Nilai fluks desorpsi ditentukan oleh besarnya koefisien perpindahan massa desorpsi yang dalam penelitian ini juga dihitung berdasarkan data percobaan. Semakin besar nilai koefisien perpindahan massa, maka akan meningkatkan fluks desorpsi. Hasil perhitungan koefisien perpindahan massa untuk proses desorpsi dijelaskan pada sub bab berikutnya, dimana koefisien perpindahan massa untuk DEA dan MDEA teraktivasi lebih tinggi dibandingkan dengan pelarut DEA dan MDEA tanpa aktivator.

Adanya aktivator dalam pelarut memberikan pengaruh yang positif dalam proses perpindahan massa CO<sub>2</sub>. Pada proses absorpsi, pengikatan CO<sub>2</sub> oleh pelarut akan berjalan lebih cepat karena aktivator berperan sebagai penghantar yang membawa CO<sub>2</sub> dari fase *liquid film* ke dalam *liquid bulk* dan kemudian aktivator akan ter-regenerasi kembali. Sedangkan pada proses desorpsi, adanya aktivator akan menyebabkan ketidakstabilan ion karbamat di dalam pelarut, sehingga ion karbamat lebih mudah terhidrolisa menjadi bikarbonat dan *zwitterion* yang kemudian akan melepas CO<sub>2</sub>.

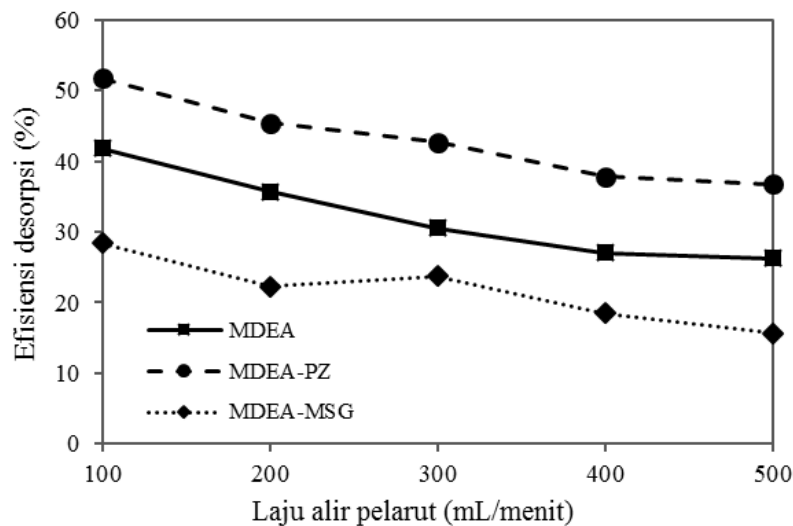
Hasil yang sama dilakukan oleh Khaisri, dkk. (2011) yang menunjukkan bahwa peningkatan laju alir pelarut menghasilkan fluks desorpsi yang semakin tinggi pada berbagai temperatur operasi yang diujikan. Jika laju alir pelarut semakin besar, kapasitas pelarut di dalam kontaktor membran juga akan semakin besar sehingga mempercepat laju berpindahnya gas CO<sub>2</sub> dari liquid ke gas yang dibantu dengan dorongan tekanan rendah. Hasil penelitian Khaisri, dkk. (2011) juga mengatakan bahwa laju alir pelarut memberikan kontribusi atau pengaruh yang lebih besar terhadap koefisien perpindahan massa total jika dibandingkan dengan pengaruh laju alir gas.

#### 4.2.2 Pengaruh Laju alir Pelarut terhadap Efisiensi Desorpsi

Pada suhu dan tekanan vakum yang konstan, efisiensi desorpsi menurun dengan meningkatnya laju alir pelarut. Seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.10** dan **Gambar 4.11**.



**Gambar 4.10** Pengaruh laju alir pelarut terhadap efisiensi desorpsi pada berbagai jenis pelarut DEA ( $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$  dan  $P_{\text{vakum}} = 0,2$  bar (gauge) )



**Gambar 4.11** Pengaruh laju alir pelarut terhadap efisiensi desorpsi pada berbagai jenis pelarut MDEA ( $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$  dan  $P_{\text{vakum}} = 0,2$  bar (gauge) )

Nilai efisiensi desorpsi tertinggi untuk pelarut DEA tanpa aktivator, DEA-PZ, DEA-Arginin, dan DEA-MSG pada laju alir pelarut 100 mL/menit adalah 57,034% ; 81,101% ; 66,088%, dan 53,721%.

Sedangkan efisiensi desorpsi tertinggi dari pelarut MDEA tanpa aktivator, MDEA-PZ dan MDEA-MSG pada laju alir pelarut 100 mL/menit adalah 41,77% ; 51,717% dan 28,365%.

Efisiensi desorpsi yang semakin turun karena naiknya laju alir pelarut dapat dihubungkan dengan efek gabungan antara penurunan koefisien perpindahan massa karena penurunan bilangan *Reynold* dan menurunnya waktu kontak gas-liquid. Waktu tinggal pelarut di dalam modul membran yang singkat akan mempercepat waktu kontak antara pelarut dan permukaan membran, sehingga jumlah CO<sub>2</sub> yang dilepaskan semakin kecil. Jika waktu tinggal dari pelarut di dalam membran lebih lama maka akan terjadi hidrolisa molekul karbamat dan protonasi molekul pelarut dari badan liquid ke lapisan batas gas-liquid yang lebih banyak, sehingga akan meningkatkan gaya dorong (*driving force*) perpindahan massa CO<sub>2</sub>. Dengan demikian kinerja perpindahan massa CO<sub>2</sub> pada proses desorpsi dipengaruhi oleh waktu kontak gas-cair. Hasil Fang, dkk. (2012) ; Khaisri, dkk. (2011) ; Mansourizadeh, A. dan Ismail, A. F. (2011) juga menunjukkan bahwa semakin tinggi laju alir pelarut akan menurunkan efisiensi desorpsi CO<sub>2</sub>.

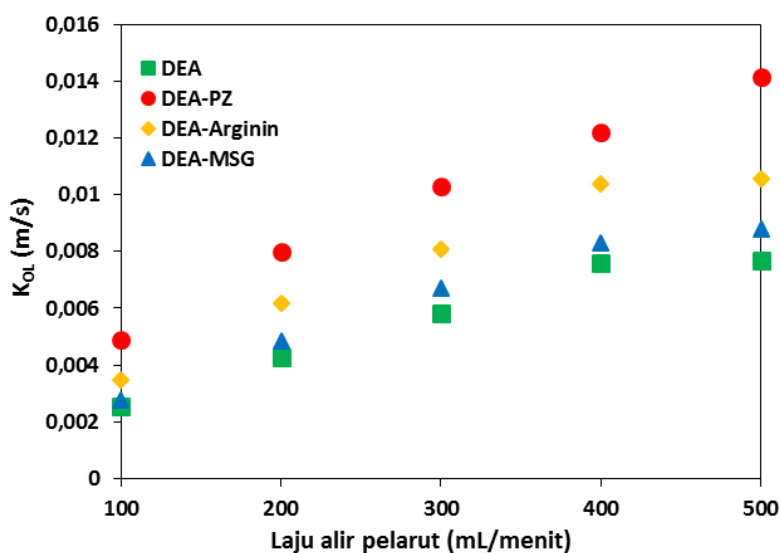
#### **4.2.3 Pengaruh Jenis Pelarut dan Penambahan Aktivator pada Proses Desorpsi**

Nilai fluks desorpsi DEA memberikan hasil lebih baik dibandingkan MDEA. Berdasarkan hasil penelitian pada suhu 30 °C diketahui bahwa pH untuk masing-masing pelarut DEA dan MDEA adalah 11,5 dan 10,09. Sehingga MDEA lebih asam yang dapat mempengaruhi tekanan parsial CO<sub>2</sub> dalam kesetimbangan dengan cairan dan menjadi gaya pendorong untuk terjadinya perpindahan massa dari cairan menuju pori membran. Rendahnya pH larutan juga akan menggeser kesetimbangan reaksi CO<sub>2</sub> ke arah pembentukan dan pelepasan gas CO<sub>2</sub> seiring dengan meningkatnya tekanan parsial CO<sub>2</sub> (Fang, dkk. 2012).

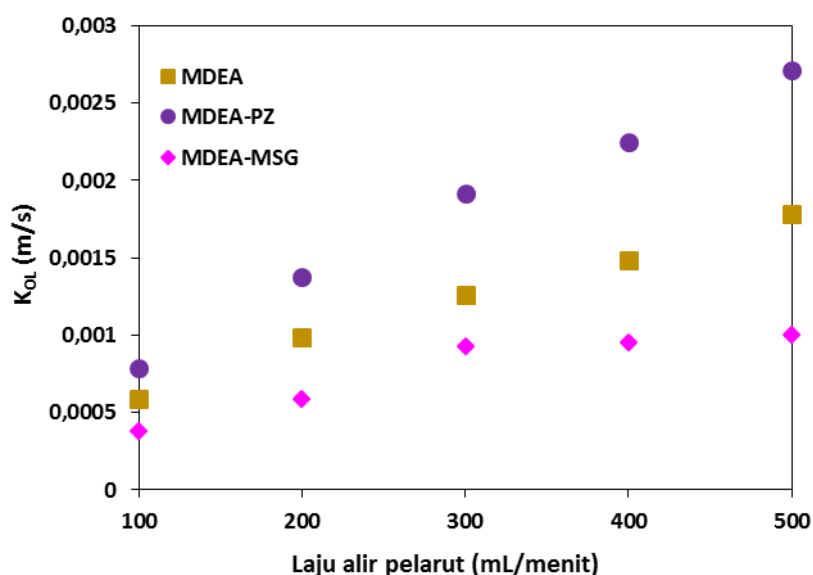
Pelarut DEA dan MDEA yang teraktivasi memberikan hasil baik dibandingkan DEA dan MDEA tanpa aktivator. Hal ini disebabkan oleh kadar keasaman (pH) pelarut DEA dan MDEA teraktivasi lebih rendah dibandingkan dengan pelarut tanpa aktivator. Berdasarkan hasil penelitian pada suhu 30°C diketahui bahwa pH untuk DEA-PZ adalah 11,34, sedangkan pH untuk MDEA-PZ adalah 9,88.

### 4.3 Koefisien Perpindahan Massa Desorpsi dari Data Eksperimen

Koefisien perpindahan massa total untuk proses desorpsi dihitung untuk masing – masing laju alir pelarut. Pengaruh laju alir terhadap koefisien perpindahan massa total desorpsi disajikan pada **Gambar 4.12** dan **Gambar 4.13**.



**Gambar 4.12** Pengaruh laju alir pelarut terhadap koefisien perpindahan massa total desorpsi pelarut DEA (  $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$  dan  $P_{\text{vakum}} = 0,2$  bar (gauge) )



**Gambar 4.13** Pengaruh laju alir pelarut terhadap koefisien perpindahan massa total desorpsi pelarut MDEA (  $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$  dan  $P_{\text{vakum}} = 0,2$  bar (gauge) )

**Gambar 4.12** dan **Gambar 4.13** menunjukkan bahwa koefisien perpindahan massa total untuk proses desorpsi bertambah besar dengan naiknya laju alir pelarut. Semakin besar laju alir pelarut menyebabkan aliran fluida menjadi lebih turbulen dan lapisan film di bagian liquid akan semakin tipis, sehingga akan mengurangi hambatan perpindahan massa di fasa liquid (Fang, dkk. 2012). Pada proses desorpsi, laju alir pelarut yang semakin besar akan menyebabkan konsentrasi  $\text{CO}_2$  di fase liquid tetap tinggi sehingga dapat meningkatkan gradien konsentrasi antara fase liquid di *tube* dan gas di bagian *shell*. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Fang, dkk (2012) dan Franco, dkk (2010) yang mengatakan bahwa semakin tinggi laju alir pelarut akan meningkatkan koefisien perpindahan massa total desorpsi.

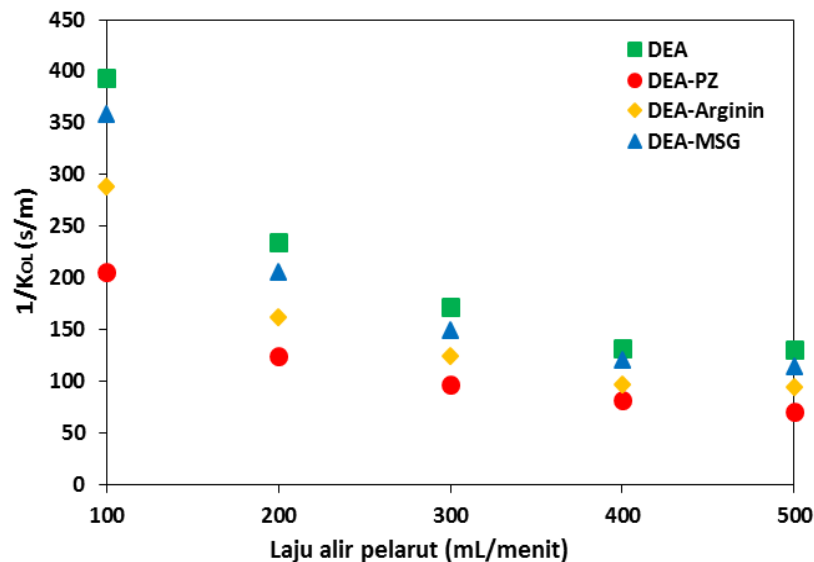
Pelarut dengan penambahan aktivator memberikan nilai  $K_{OL}$  lebih tinggi dibandingkan dengan pelarut tanpa aktivator, dimana nilai  $K_{OL}$  paling tinggi adalah pada laju alir 500 mL/menit. Nilai  $K_{OL}$  tertinggi untuk DEA tanpa aktivator, DEA-PZ, DEA-Arginin, dan DEA-MSG adalah  $7,68 \times 10^{-3}$  m/s ;  $14,12 \times 10^{-3}$  m/s ;  $10,56 \times 10^{-3}$  m/s ; dan  $8,79 \times 10^{-3}$  mol/m<sup>2</sup>.s.



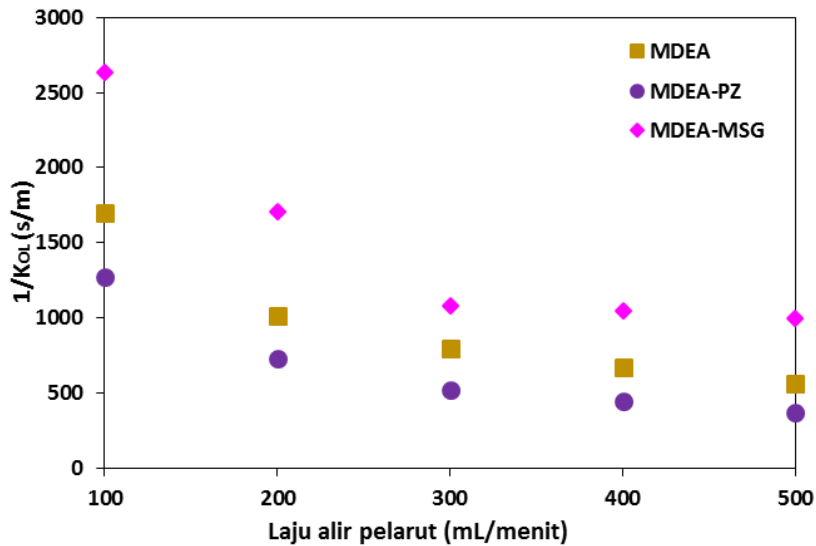
Sedangkan untuk nilai  $K_{OL}$  tertinggi untuk pelarut MDEA tanpa aktivator, MDEA-PZ, dan MDEA-MSG pada laju alir pelarut 500 mL/menit adalah  $1,79 \times 10^{-3}$  m/s ;  $2,71 \times 10^{-3}$  m/s ; dan  $1,01 \times 10^{-3}$  m/s.

Dari kedua jenis pelarut yang digunakan, DEA memberikan nilai  $K_{OL}$  yang lebih besar, dimana nilai  $K_{OL}$  yang semakin besar menunjukkan kecepatan perpindahan massa  $CO_2$  yang lebih tinggi.

Meningkatnya koefisien perpindahan massa total karena kecepatan pelarut yang semakin besar berhubungan dengan hambatan perpindahan massa total. Hambatan perpindahan massa total ( $1/K_{OL}$ ) terdiri dari tiga hambatan perpindahan massa individu, yaitu pada bagian liquid ( $1/k_L$ ), membran ( $1/k_M$ ), dan gas ( $1/k_G$ ). Hubungan antara laju alir pelarut dengan hambatan perpindahan massa total ditunjukkan oleh **Gambar 4.14** dan **Gambar 4.15**.



**Gambar 4.14** Pengaruh laju alir pelarut terhadap hambatan perpindahan massa total desorpsi pelarut DEA (  $T_{\text{pelarut}} = 70^\circ\text{C}$  dan  $P_{\text{vakum}} = 0,2$  bar (gauge) )



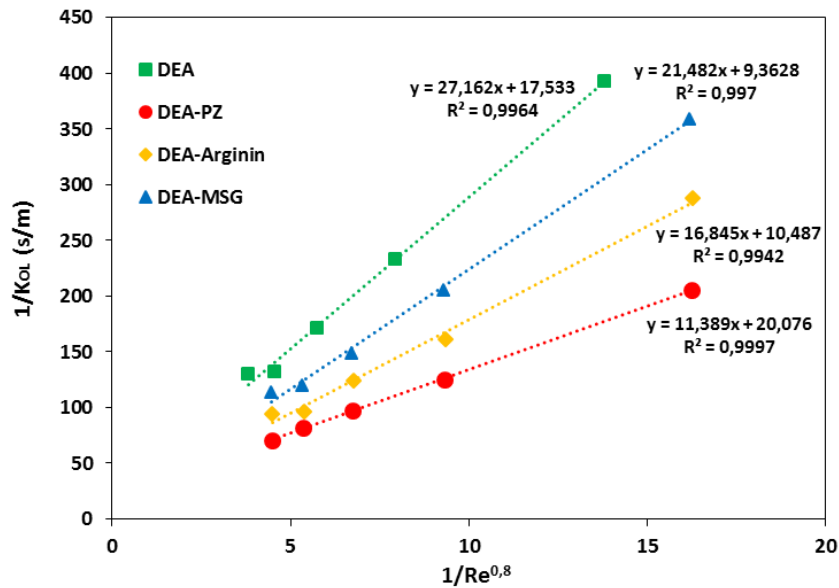
**Gambar 4.15** Pengaruh laju alir pelarut terhadap hambatan perpindahan massa total desorpsi pelarut MDEA (  $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$  dan  $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar}$  (gauge) )

**Gambar 4.14** dan **Gambar 4.15** menunjukkan bahwa untuk semua jenis pelarut, hambatan perpindahan massa total ( $1/K_{OL}$ ) semakin kecil dengan meningkatnya laju alir pelarut. Semakin cepat laju alir pelarut akan memperkecil ketebalan lapisan batas pada fase liquid. Oleh karena itu, laju alir menjadi faktor operasi utama yang mengontrol pada proses desorpsi (Fang, 2012).

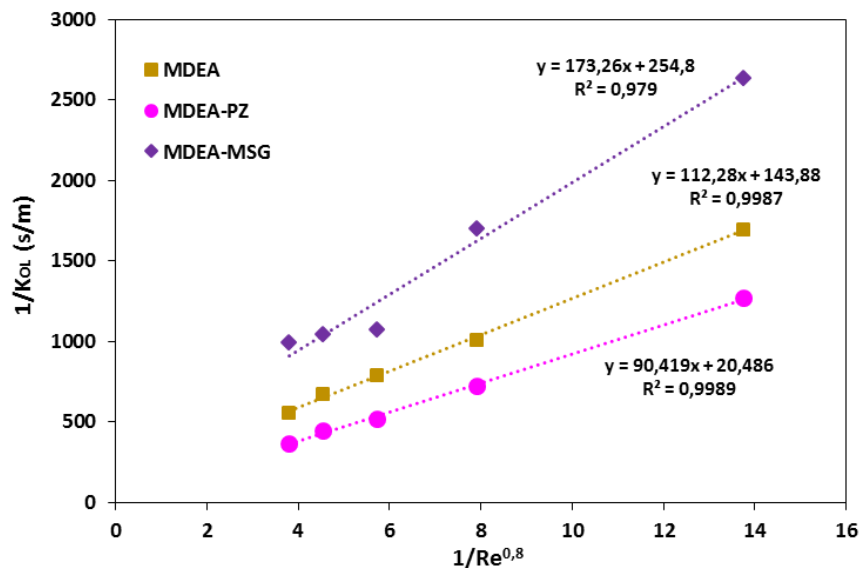
Berdasarkan analogi perpindahan panas yang diusulkan oleh Wilson, hambatan individu dapat ditentukan tergantung dari nilai hambatan total pada kecepatan liquid. Perhitungan terdiri dari dua langkah, yaitu menghitung koefisien perpindahan massa total untuk setiap percobaan dan kemudian plot grafik hambatan perpindahan massa total sebagai fungsi dari invers bilangan Reynolds. Karena hambatan pada fase gas dan membran bukan merupakan fungsi dari kecepatan cairan, maka total hambatan pada fase gas dan hambatan membran merupakan intersep dari plot Wilson. Seperti yang dijelaskan dengan persamaan berikut ini :

$$\frac{1}{K_{OL}} = \underbrace{slope \times \frac{1}{Re^{0.8}}}_{\frac{1}{k_L}} + \underbrace{intercept}_{\frac{1}{k_G} + \frac{1}{k_M}}$$

**Gambar 4.16** dan **Gambar 4.17** adalah plot Wilson untuk proses desorpsi pada pelarut DEA dan MDEA dengan berbagai jenis aktivator.



**Gambar 4.16** Plot Wilson untuk pelarut DEA ( $T_{\text{pelarut}} = 70^\circ\text{C}$  dan  $P_{\text{vakum}} = 0,2$  bar (gauge) )

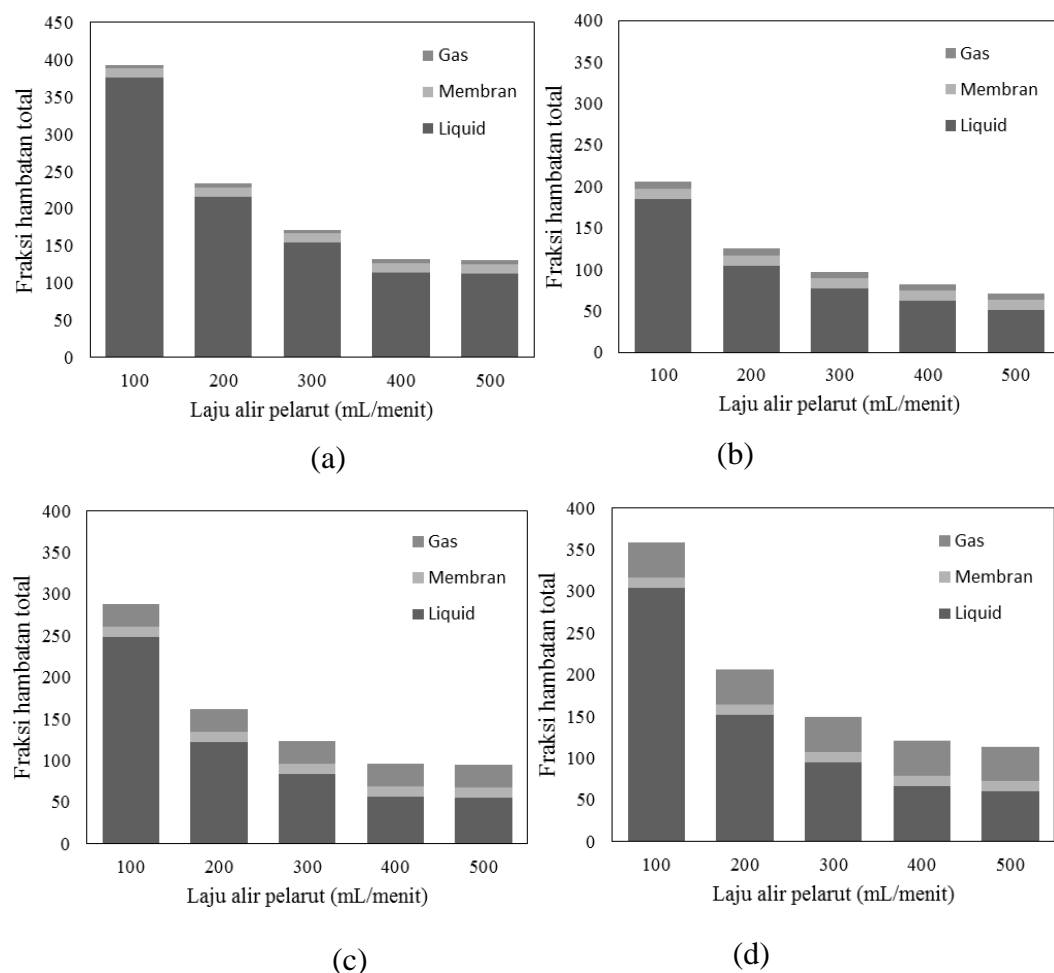


**Gambar 4.17** Plot Wilson untuk pelarut MDEA (  $T_{\text{pelarut}} = 70^\circ\text{C}$  dan  $P_{\text{vakum}} = 0,2$  bar (gauge) )

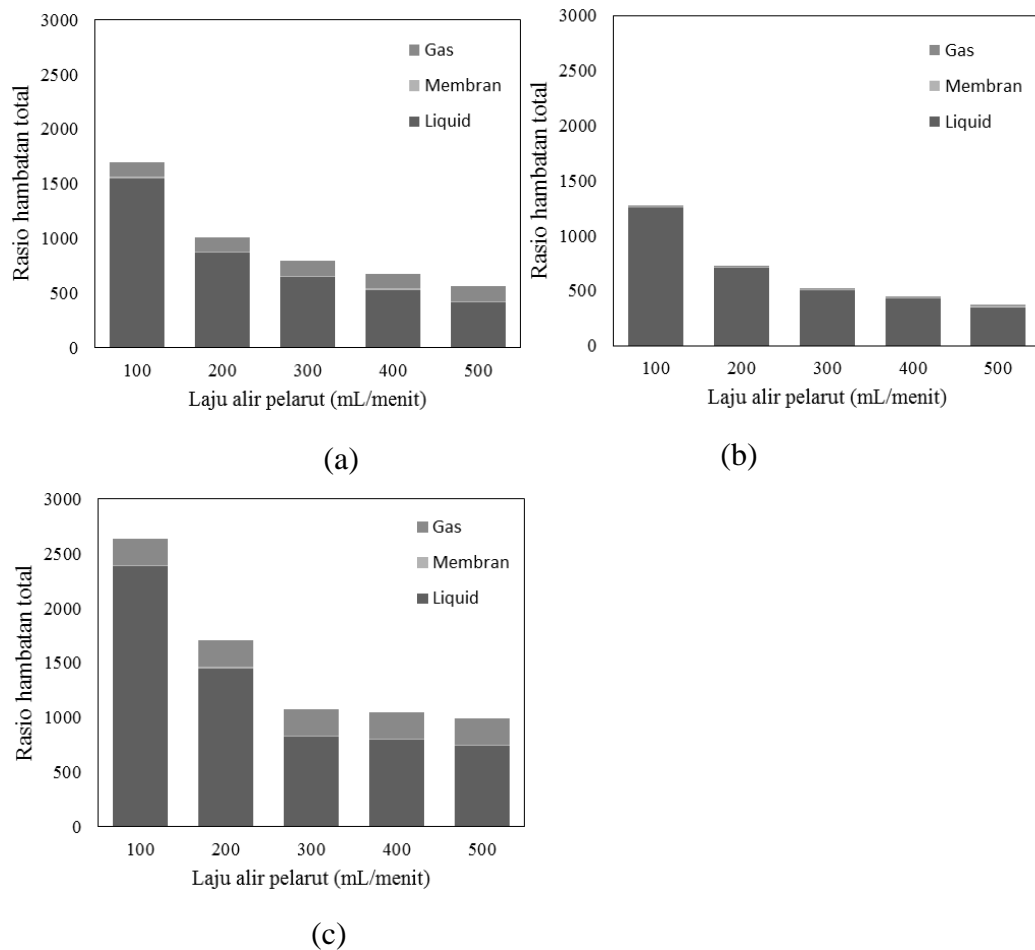
Persamaan Wilson Plot untuk pelarut DEA tanpa aktivator adalah  $1/K_{OL} = 27,162(1/Re^{0.8}) + 17,533$  dan untuk DEA-PZ adalah  $1/K_{OL} = 11,389(1/Re^{0.8}) + 20,076$ . Sedangkan Persamaan Wilson Plot untuk pelarut MDEA tanpa aktivator

adalah  $1/K_{OL} = 112,28(1/Re^{0,8}) + 143,88$  dan untuk MDEA-PZ adalah  $1/K_{OL} = 90,419(1/Re^{0,8}) + 20,486$ .

Dari persamaan garis tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai ( $slope \times 1/Re^{0,6}$ ) > *intercept* , yang artinya hambatan perpindahan massa di fase liquid lebih besar dibandingkan jumlah hambatan perpindahan massa di bagian gas dan membran. Sehingga dapat disimpulkan bahwa laju alir pelarut memberikan dampak yang dominan terhadap hambatan perpindahan massa total. Hasil penelitian yang sama tentang pengaruh laju alir terhadap nilai koefisien perpindahan massa total juga diungkapkan oleh Fang, dkk. (2012) dan Franco, dkk. (2010).



**Gambar 4.18** Perbandingan hambatan perpindahan massa untuk pelarut DEA dan campurannya : (a) DEA (b) DEA-PZ (c) DEA-Arginin (d) DEA-MSG

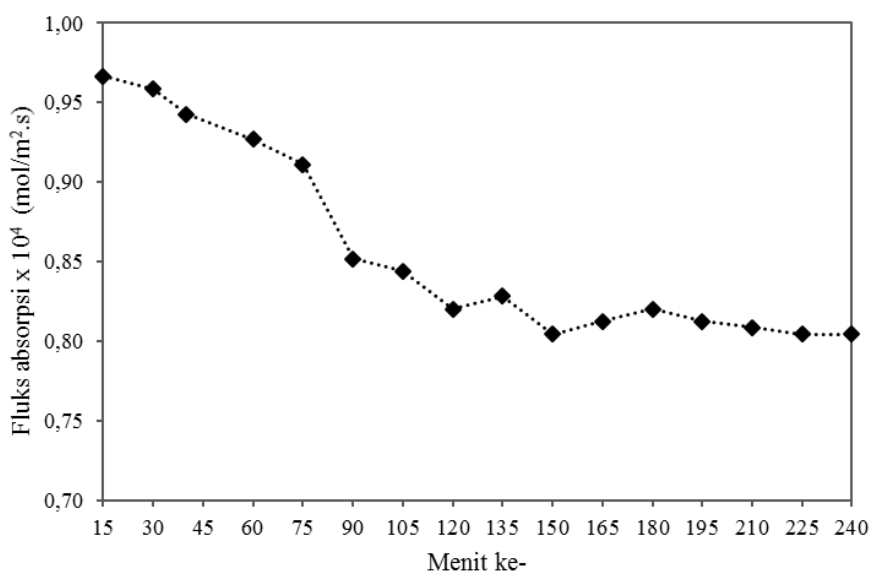


**Gambar 4.19** Perbandingan hambatan perpindahan massa untuk pelarut MDEA dan campurannya : (a) MDEA (b) MDEA-PZ (c) MDEA-MSG

Berdasarkan **Gambar 4.18** dan **Gambar 4.19** semakin besar laju alir liquid, prosentase hambatan di bagian liquid akan berkurang. Hal ini berhubungan dengan tebal lapisan batas liquid yang semakin tipis. Pada penelitian ini, hambatan di sisi membran konstan karena dianggap tidak terjadi fenomena pembasahan. Dimana nilai hambatan di sisi membran dihitung dari persamaan (3.13) adalah 12,3496 s/m. Sehingga nilai hambatan pada bagian gas juga cenderung tidak berubah atau konstan. Pembasahan membran akan meningkatkan hambatan di bagian membran dan fenomena ini dijelaskan dalam penelitian Khaishri, dkk (2011) ; Lv, dkk (2010) ; dan Wang, dkk (2005).

#### 4.4 Uji Kinerja Kontaktor Membran secara Simultan

Uji kinerja pada modul kontaktor membran dilakukan untuk mengetahui ketahanan modul membran yang dapat dilihat dari nilai fluks dan %CO<sub>2</sub> removal absorpsi. Uji kinerja dilakukan secara kontinyu selama 240 menit operasi dengan menggunakan pelarut DEA-PZ yang pada percobaan sebelumnya memberikan hasil terbaik. Parameter operasi untuk uji kinerja kontaktor membran secara simultan adalah dengan konsentrasi gas CO<sub>2</sub> masuk absorpsi C<sub>CO<sub>2</sub>,in</sub> = 40% vol, laju alir gas umpan 600 ml/menit, dan laju alir pelarut 100 ml/menit untuk absorpsi maupun desorpsi. Kemudian suhu pemanasan pelarut untuk proses desorpsi adalah 70°C dan tekanan vakum desorpsi sebesar 0,2 bar (gauge). Nilai fluks absorpsi dari hasil percobaan disajikan pada **Gambar 4.20**.



**Gambar 4.20** Pengaruh waktu operasi terhadap fluks absorpsi (C<sub>CO<sub>2</sub>,in</sub> = 40% vol; Q<sub>g</sub>=600 ml/menit; Q<sub>l</sub> = 100 ml/menit ; T<sub>pelarut-desorpsi</sub> = 70°C ; P<sub>vakum</sub>= 0,2 bar (gauge) )

**Gambar 4.20** menunjukkan nilai fluks absorpsi yang terus menurun seiring bertambahnya waktu operasi hingga 75 menit dan setelah itu menunjukkan nilai yang konstan sampai menit ke-240. Menurunnya nilai fluks absorpsi ini disebabkan oleh fenomena pembasahan pada membran. Fenomena pembasahan

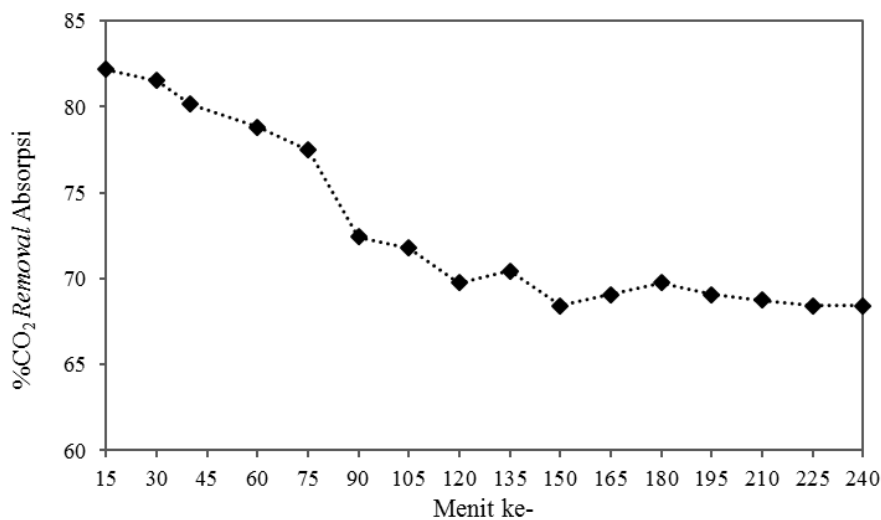
adalah masuknya liquid ke dalam pori pori membran, sehingga hal ini dapat menghambat laju perpindahan massa CO<sub>2</sub>.

Rahim, dkk (2015) melakukan penelitian uji kinerja kontaktor membran untuk absorpsi selama 200 menit menggunakan 6 jenis pelarut yang berbeda. Hasil menunjukkan bahwa efisiensi absorpsi (%) pada 100 menit pertama masih stabil dan kemudian mulai menurun sampai menit ke-200. Dari hasil percobaan, Rahim, dkk (2015) juga menganalisa pengaruh sudut kontak antara liquid dan membran. Besarnya sudut kontak memiliki pengaruh dalam fenomena pembasahan. Jika sudut kontak antara liquid dan membran semakin besar, maka permukaan membran akan lebih hidrofobik atau sulit untuk terbasahi.

Lv, dkk. (2012) juga melakukan penelitian uji kinerja kontaktor membran polipropilena dengan pelarut MEA selama dua minggu (14 hari) dan hasil yang didapatkan adalah fluks absorpsi masih stabil pada tiga hari pertama kemudian mulai menurun pada hari ke-4 hingga hari ke-14. Lv, dkk (2012) menjelaskan bahwa penurunan nilai fluks absorpsi setelah tiga hari operasi disebabkan oleh meningkatnya hambatan perpindahan massa di bagian membran yang disebabkan karena sebagian pori membran terisi oleh pelarut.

Hambatan perpindahan massa membran pada kontaktor membran meningkat karena adanya cairan mengisi pori membran sehingga terjadi pembasahan yang menyebabkan menurunnya difusivitas gas ketika melewati pori membran. Wang, dkk. (2004) melakukan penelitian tentang pengaruh pelarut DEA pada permukaan membran polipropilena dan menemukan hasil bahwa ketika terjadi kontak antara DEA dan membran polipropilena dalam waktu lama memberikan pengaruh yang signifikan pada struktur pori – pori permukaan membran. Ukuran pori – pori membran yang menjadi lebih besar dikaitkan pada penyerapan yang terjadi pada bagian meniskus cairan ke dalam pori membran yang kemudian menyebabkan pembasahan dan perubahan morfologi pori.

Selain melihat nilai fluks absorpsi sebagai hasil analisa uji kontaktor membran secara simultan, nilai %CO<sub>2</sub> *removal* absorpsi juga dapat dianalisa berdasarkan **Gambar 4.21** berikut ini.



**Gambar 4.21** Pengaruh waktu operasi terhadap %CO<sub>2</sub> *removal* absorpsi ( $C_{CO_2, in} = 40\%$  vol ;  $Q_g = 600$  ml/menit;  $Q_l = 100$  ml/menit ;  $T_{\text{pelarut-desorpsi}} = 70^\circ\text{C}$  ;  $P_{\text{vakum}} = 0,2$  bar (gauge) )

**Gambar 4.21** menunjukkan kecenderungan yang sama antara %CO<sub>2</sub> *removal* dengan fluks absorpsi yang ditunjukkan pada **Gambar 4.20**. Pada 75 menit pertama, %CO<sub>2</sub> *removal* mengalami penurunan dan selanjutnya cenderung konstan. Menurunnya %CO<sub>2</sub> *removal* pada 60 menit pertama disebabkan oleh fenomena pembasahan, dimana pori membran terisi oleh cairan sehingga hambatan membran menjadi lebih besar dan gas CO<sub>2</sub> dalam aliran gas umpan tidak lagi terserap secara maksimal oleh pelarut dan juga sebaliknya untuk proses desorpsi menggunakan tekanan vakum.

Hasil ini sesuai dengan penelitian Kosaraju (2005) yang menjelaskan pengaruh fenomena pembasahan terhadap bertambahnya hambatan yang dikarenakan oleh pori membran terisi oleh pelarut. Pelarut yang masuk ke dalam pori membran berperan sebagai pembawa gas CO<sub>2</sub> dan menambah hambatan pada membran sehingga absorpsi CO<sub>2</sub> tidak mengalami kenaikan efisiensi pemisahan dengan seiring bertambahnya waktu operasi. Setelah terjadinya fenomena pembasahan, performa kontakor membran telah mencapai titik minimal sehingga nilai %CO<sub>2</sub> *removal* cenderung stabil.

Selain karena adanya pengaruh pembasahan pada pori membran, menurunnya efisiensi pemisahan CO<sub>2</sub> setelah 15 menit pertama juga disebabkan oleh pelarut DEA yang disirkulasi mulai jenuh. Pada 75 menit pertama efisiensi



pemisahan gas CO<sub>2</sub> masih tinggi dan cenderung menurun dikarenakan pelarut yang masuk berupa pelarut yang belum jenuh. Setelah melewati 75 menit, efisiensi pemisahan CO<sub>2</sub> menurun dan mencapai kondisi konstan sehingga dapat dikatakan bahwa pelarut yang disirkulasi telah jenuh dan sudah tidak dapat lagi menyerap CO<sub>2</sub> secara efektif. Sehingga akan mempengaruhi nilai %CO<sub>2</sub> *removal* jika dibandingkan dengan nilai %CO<sub>2</sub> *removal* absorpsi DEA-PZ secara terpisah pada parameter operasi  $Q_{L,in} = 100$  mL/ menit dan  $Q_{G,in} = 600$  mL/menit. Nilai %CO<sub>2</sub> *removal* absorpsi pada proses simultan lebih kecil daripada nilai %CO<sub>2</sub> *removal* absorpsi secara terpisah. Nilai %CO<sub>2</sub> *removal* absorpsi DEA-PZ secara simultan pada 15 menit operasi adalah 81,191%, sedangkan nilai fluks absorpsi secara terpisah adalah 86,793%.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

1. - **Absorpsi :**

DEA-PZ merupakan pelarut yang efektif untuk proses absorpsi dengan pertimbangan sebagai berikut :

- Nilai fluks absorpsi tertinggi adalah  $3,2488 \times 10^{-4}$  mol/m<sup>2</sup> pada  $Q_{L,in} = 500$  mL/menit dan  $Q_{G,in} = 600$  mL/menit.
- %CO<sub>2</sub> *removal* absorpsi tertinggi adalah 93,5737% pada  $Q_{L,in} = 500$  mL/menit dan  $Q_{G,in} = 600$  mL/menit.

- **Desorpsi :**

- Pada kondisi operasi  $T_{\text{pelarut}} = 70^{\circ}\text{C}$  dan  $P_{\text{vakum}} = 0,2$  bar (gauge), pelarut DEA-PZ memberikan efisiensi desorpsi tertinggi dibandingkan dengan pelarut lainnya, yaitu sebesar 81,101% pada  $Q_{L,in} = 100$  mL/menit dan  $Q_{G,in} = 600$  mL/menit. Dan nilai fluks desorpsi DEA-PZ adalah  $6,8631 \times 10^{-3}$  mol/m<sup>2</sup> pada  $Q_{L,in} = 100$  mL/menit dan  $Q_{G,in} = 600$  mL/menit.

2. Dari ketiga jenis aktivator yang digunakan, aktivator PZ memberikan nilai fluks dan efisiensi paling tinggi.
3. Persamaan Wilson Plot untuk proses desorpsi menggunakan pelarut DEA tanpa aktivator adalah  $1/K_{OL} = 27,162(1/Re^{0,8}) + 17,533$  sedangkan untuk DEA-PZ adalah  $1/K_{OL} = 11,389(1/Re^{0,8}) + 20,076$ . Sedangkan untuk pelarut MDEA tanpa aktivator adalah  $1/K_{OL} = 112,28(1/Re^{0,8}) + 143,88$  dan untuk MDEA-PZ adalah  $1/K_{OL} = 90,419(1/Re^{0,8}) + 20,486$ .
4. Nilai fluks dan %CO<sub>2</sub> *removal* absorpsi terus menurun seiring bertambahnya waktu operasi hingga 75 menit pertama dan setelah itu menunjukkan nilai yang konstan sampai menit ke-120. %CO<sub>2</sub> *removal* absorpsi tertinggi untuk uji kinerja kontaktor membran absorpsi-desorpsi secara simultan adalah 82,191%.

## 5.2 Saran

1. Hasil penelitian untuk proses desorpsi belum mencapai kondisi optimal jika dibandingkan nilai fluks dan %CO<sub>2</sub> *removal* untuk proses absorpsi. Untuk penelitian selanjutnya selain dengan regenerasi vakum juga digunakan bantuan *sweeping gas* untuk menambah gaya pendorong (*driving force*) perpindahan massa CO<sub>2</sub>.
2. Selain itu, dapat dicoba variasi tekanan vakum yang lebih tinggi dari 20kPa untuk mengetahui pengaruh tekanan vakum terhadap proses desorpsi.
3. Nilai fluks dan %CO<sub>2</sub> *removal* untuk proses absorpsi lebih tinggi dibandingkan proses desorpsi CO<sub>2</sub> dapat disebabkan oleh luas kontak *gas-liquid*. Untuk penelitian selanjutnya jumlah membran desorpsi dapat dibuat menjadi 1,25 kali lebih banyak dari jumlah membran absorpsi berdasarkan perhitungan luas kontak kontaktor membran absorpsi dan desorpsi yang digunakan.
4. Perlu dilakukan analisa *gas chromatografi* untuk mengetahui konsentrasi gas CO<sub>2</sub> di *sales gas* dan memvalidasi hasil dari analisa titrasi *chittick* yang dilakukan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Atchariyawut, S., Feng, C., Wang, R., Jiraratananon, R. dan Liang, D.T. 2006. "Effect of Membrane Structure on Mass Transfer in The Membrane Gas-Liquid Contacting Process Using Microporous PVDF Hollow Fibers". *Journal of Membrane Science*, 285, 272-281.
- Dindore, V.Y., Brilman, D.W.F., Geuzebroek, F.H. dan Versteeg, G.F. 2004. "Membrane-Solvent Selection for CO<sub>2</sub> Removal Using Membrane Gas-Liquid Contactors". *Separation and Purification Technology* 40(2): 133-45.
- Dubois, L., dan Thomas, D. 2009. "CO<sub>2</sub> Absorption into Aqueous Solutions of Monoethanolamine, Methyldiethanolamine, Piperazine and Their Blends". *Chemical Engineering and Technology*, 32(5), 710-718.
- Fang, M., Yan, S., Luo, Z., Ni, M., dan Cen, K. 2009. "CO<sub>2</sub> Chemical Absorption by Using Membrane Vacuum Regeneration Technology". *Energy Procedia*, 1(1), 815-822.
- Fang, M., Wang, Z., Yan, S., Cen, Q., dan Luo, Z. 2012. "CO<sub>2</sub> Desorption from Rich Alkanolamine Solution by Using Membrane Vacuum Regeneration Technology". *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 9, 507-521.
- Feron, P. H. M. dan Jansen, A. E. 1995. "Capture of Carbon Dioxide Using Membrane Gas Absorption and Reuse in the Horticultural Industry." *Energy Conversion dan Management* 36(6-9): 411-14.
- Feron, P. H. M. dan Jansen, A. E. 2002. "CO<sub>2</sub> Separation with Polyolefin Membrane Contactors dan Dedicated Absorption Liquids: Performances dan Prospects." *Separation and Purification Technology* 27(3): 231-42.
- Franco, J., deMontigny, D., Kentish, S., Perera, J., dan Stevens, G. 2010. "A Study of Mass Transfer of CO<sub>2</sub> through Difference Membrane Materials in the Membrane Gas Absorption Process". *Separation Science and Technology*, 43:2, 225 - 244.
- Gabelman, A., dan Hwang, S.T. 1999. "Hollow Fiber Membrane Contactors." *Journal of Membrane Science* 159(1-2): 61-106.
- GPSA. 2004. "Engineering Data Book". Oklahoma : GPSA

- Hedayat, Mahdi, Soltanieh, M., dan Mousavi, S. A. 2011. "Simultaneous Separation of H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> from Natural Gas by Hollow Fiber Membrane Contactor Using Mixture of Alkanolamines." *Journal of Membrane Science* 377: 191–97.
- Karoor, S. dan Sirkar K.K. 1993. "Gas Absorption Studies in Microporous Hollow Fiber Membrane Modules." *Industrial and Engineering Chemistry Research* 32: 674–84.
- Kartohardjono, S., Anggara, Subihi, dan Yuliusman. 2007. "Absorpsi CO<sub>2</sub> dari Campurannya dengan CH<sub>4</sub> atau N<sub>2</sub> melalui Kontaktor Membran Serat Berongga Menggunakan Pelarut Air." 11(2) : 97–102.
- Khaisri, S., deMontigny, D., Tontiwachwuthikul, P., dan Jiratananon, R. 2011. "CO<sub>2</sub> Stripping from Monoethanolamine Using a Membrane Contactor." *Chemical Engineering Research and Design*.
- Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi. (halaman web : <http://migas.esdm.go.id/post/category/petaddanata> diakses tanggal 28 Januari 2017)
- Kim, Y.S. dan Yang, S.M. 2000. "Absorption of Carbon Dioxide through Hollow Fiber Membranes Using Various Aqueous Absorbents." *Separation dan Purification Technology* 21(1–2): 101–9.
- Kohl, A. dan Nielsen, R. 1997. *Gas Purification*. Texas: Gulf Publishing.
- Kosaraju, P., Kovvali, S., Korikov, dan Sirkar, K. K. 2005. "Hollow Fiber Membrane Contactor Based CO<sub>2</sub> Absorption–Stripping Using Novel Solvents dan Membranes". *Industrial dan Engineering Chemistry Research*, 44(5), 1250–1258.
- Kreulen, H., Smolders, C.A., Versteeg, G.F. dan van Swaaij, W.P.M. 1993. "Determination of Mass Transfer Rates in Wetted dan Non-Wetted Microporous Membranes." *Chemical Engineering Science* 48(11): 2093–2102.
- Kumar, P.S., Hogendoorn, J.A., Feron, P.H.M dan Versteeg, G.F. 2002. "New Absorption Liquids for the Removal of CO<sub>2</sub> from Dilute Gas Streams Using Membrane Contactors." *Chemical Engineering Science* 57(9): 1639–51.
- Li, J. L., dan Chen, B. H. 2005. "Review of CO<sub>2</sub> Absorption Using Chemical

- Solvents in Hollow Fiber Membrane Contactors". *Separation dan Purification Technology*, 41(2), 109–122.
- Lu, J.G, Zheng, Y.F., Cheng, M.D., dan Wang, L.J. 2007. "Effects of Activators on Mass-Transfer Enhancement in a Hollow Fiber Membrane COntactor Using Activated Alkanolamines Solutions". *Journal of Membrane Science*. 289. 138–149.
- Lv, Y., Yu, X., Tung Tu, S., Yan, J., dan Dahlquist, E. 2012. "Experimental Studies Simultaneous Removal of CO<sub>2</sub> dan SO<sub>2</sub> in a Polypropylene Hollow Fiber Membrane Contactor." *Applied Energy* 97: 283–88.
- Mandal, B. P., Biswas, A. K., dan Bdanyopadhyay, S. S. 2003. "Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Blends of 2-amino-2-methyl-1-propanol dan Diethanolamine". *Chemical Engineering Science*, 58(18), 4137–4144.
- Mansourizadeh, A., dan Ismail, A. F. 2009. "Hollow Fiber Gas-Liquid Membrane Contactors for Acid Gas Capture: A Review." *Journal of Hazardous Materials* 171(1–3): 38–53.
- Mansourizadeh, A., dan Ismail, A. F. 2011. "CO<sub>2</sub> Stripping from Water Through Porous PVDF Holow Fiber Membrane Contactor". *Desalination*, 273, 386–390.
- Ma'mun, S. 2005. "Selection dan characterization of new absorbents for carbon dioxide capture (Doctoral Thesis)". *Norway: Norwegian University of Science dan Technology*.
- Mulder, M. 1996. *Basic Principles of Membrane Technology*. 2<sup>nd</sup> Ed. Kluwer Academic: Dordrecht.
- Ningsih, E., Sato, A., Nafiuddin, M.A., dan Putranto, W.S. 2017. "Absorpsi Gas CO<sub>2</sub> Berpromotor MSG dalam Larutan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. *Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Industri*. ISSN 2085-4218.
- Perry, R.H., dan Green, D. W. 2008. "Perryis Chemical Engineer's Hdanbook". Amerika.
- Qi, Z., dan Cussler, E. L. 1985. "Microporous Hollow Fibers for Gas Absorption I. Mass transfer in the liquid". *Journal of Membrane Science*, 23(3), 321–332.
- Qi, Z. dan Cussler, E.L. 1985. "Microporous Hollow Fibers for Gas Absorption II.

- Mass Transfer across the Membrane.” *Journal of Membrane Science* 23(3): 321–332.
- Rahim, N. A., Ghasem, N., dan Al-Marzouqi, M. 2015. "Absorption of CO<sub>2</sub> from Natural Gas Using Different Amino Acid Salt Solutions dan Regeneration Using Hollow Fiber Membrane Contactors. *Journal of Natural Gas Science dan Engineering*, 26, 108–117.
- Rahmawati, Y., Setiani; dan Syafira. 2014. "Pengaruh Modifikasi Permukaan Membran Polipropilen untuk Proses Pemisahan CO<sub>2</sub>". Jurusan Teknik Kimia: Surabaya.
- Rangwala, H. A. 1996. “Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Solutions Using Hollow Fiber Membrane Contactors.” *Journal of Membrane Science* 112(2): 229–40.
- Satyana, A. H., Marpaung, L., Purwaningsih, Margareta., dan Utama, M. K. 2007. "Regional Gas Geochemistry of Indonesia : Genetic Characterization and Habitat of Natural Gases". IPA07-G-050
- Wang, S., Hawboldt, K. dan Abdi, M.A. 2006. “Novel Dual-Membrane Gas - Liquid Contactors : Modelling dan Concept Analysis.” : 7882–91.
- Yeon, S.H., Sea, B. Park Y.I., Lee, K.S. dan Lee, K.H. 2004. "Absorption of Carbon Dioxide Characterized by Using the Absorbent Composed of Piperazine dan Triethanolamine", *Separation Science dan Technology*. 39(14), 3281–3300.
- Yildirim, O., Kiss A.A., Huser, N., Lessman, K., dan Kenig, E.Y. 2012. "Reactive absorption in chemical process industry: a review on current activities". *Chemical Engineering Journal*, 1(213), 371-391.
- Zhang, Z.E., Yan, Y.F., Zhang, L., dan Ju, S.X. 2014. " Hollow Fiber Membrane Contactor Absorption Of CO<sub>2</sub> from The Flue Gas : Review and Perspective". *Global NEST Journal*, 16(2), 354-373.



## DAFTAR NOTASI

Notasi	Keterangan	Satuan
$A$	luas kontak gas-cair	(m <sup>2</sup> )
$C_{in}$	konsentrasi CO <sub>2</sub> dalam gas masuk absorber	(mol/m <sup>3</sup> )
$C_{out}$	konsentrasi CO <sub>2</sub> dalam gas masuk desorber	(mol/m <sup>3</sup> )
$C'_{in}$	konsentrasi CO <sub>2</sub> dalam pelarut masuk desorber	(mol CO <sub>2</sub> /mol pelarut)
$C'_{out}$	konsentrasi CO <sub>2</sub> dalam pelarut keluar desorber	(mol CO <sub>2</sub> /mol pelarut)
$C_{ig}$	konsentrasi komponen i dalam fasa gas	(mol/L)
$C_{img}$	konsentrasi komponen i pada antarfasa gas-membran	(mol/L)
$C_{ilg}$	konsentrasi komponen i pada antarfasa gas-cairan	(mol/L)
$C_{il}$	konsentrasi komponen i dalam fasa cairan	(mol/L)
$C_1$	konsentrasi sampel pelarut pada titrasi chittic	(mL)
$D_1$	difusi dari gas dalam cairan	(m <sup>2</sup> /det)
$d_i$	diameter dalam membran	(mm)
$d_o$	diameter luar membran	(mm)
$d_p$	diameter pori membran	(mm)
$d_{im}$	diameter rata-rata di bagian membran	(mm)
$d_h$	diameter hidraulik dari modul membran	(m)
$E$	faktor hambatan	-
$H$	konstanta hukum Henry	-
$J$	laju perpindahan massa	(mol/s.m <sup>2</sup> )
$K_{OL}$	koefisien perpindahan massa total	(m/det)
$1/K_{OL}$	hambatan perpindahan massa total	(det/m)
$k_{il}$	koefisien perpindahan massa dalam fasa cairan untuk komponen i	(m/det)
$k_{ig}$	koefisien perpindahan massa dalam fasa gas untuk komponen i	(m/det)
$k_{im}$	koefisien perpindahan massa dalam membran untuk komponen i	(m/det)
$M_L$	Molaritas pelarut keluar desorber	(mol/L)
$M_R$	Molaritas pelarut masuk desorber	(mol/L)

$N$	normalitas	(mol/L)
$P$	tekanan	(atm)
$Q_{in}$	laju alir CO <sub>2</sub> masuk absorber	(ml/menit)
$Q_{out}$	laju alir CO <sub>2</sub> masuk desorber	(ml/menit)
$R$	Konstanta gas	(atm.cm <sup>3</sup> /mol.K)
$r_{maks}$	ukuran pori membran maksimum	(mm)
$Re$	Bilangan Reynold	-
$Sh$	bilangan Sherwood	-
$Sc$	Bilangan Schmidt	-
$T$	temperatur	(K)
$V_{gas}$	Perubahan volume larutan NaCl pada titrasi chittic	(mL)
$V_{HCl}$	Perubahan volume larutan HCl pada titrasi chittic	(mL)
$V_1$	Volume sampel pelarut pada titrasi chittic	(mL)
$v$	velocity rata-rata dari cairan	(m/det)
$X$	fraksi mol	-
$\eta$	efisiensi absorpsi – desorpsi CO <sub>2</sub>	(%)
$\alpha$	CO <sub>2</sub> loading di dalam pelarut	(mol CO <sub>2</sub> /mol pelarut)
$\theta$	sudut kontak	(°)
$\gamma_L$	tegangan permukaan pelarut	(kg/m <sup>2</sup> )
$\theta$	sudut kontak antara pelarut dan membran	0

## **LUARAN**

1. Telah diseminarkan dan dipublikasikan dalam : The 13<sup>rd</sup> International Conference on Membrane Science and Technology (MST) pada November 2017 yang diselenggarakan oleh Jurusan Teknik Kimia, UNDIP Semarang
2. Telah diseminarkan dan dipublikasikan dalam : The 3<sup>rd</sup> International Conference on Innovation and Industrial Application (CINIA) pada November 2017 yang diselenggarakan oleh BPPU (Badan Pengembangan dan Pengelola Usaha) ITS, Surabaya.

## LAMPIRAN A

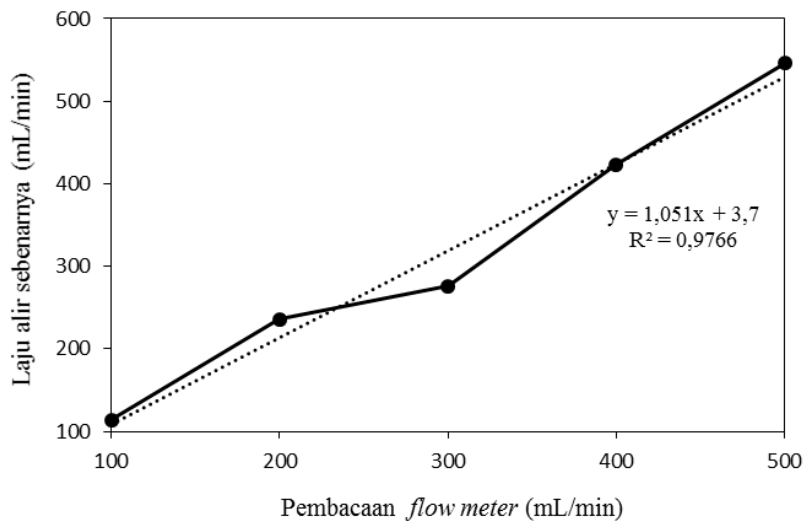
### KALIBRASI PERALATAN DAN CONTOH PERHITUNGAN

#### A.1 Kalibrasi *flow meter liquid*

Sebelum dilakukan penelitian, terlebih dahulu dilakukan kalibrasi peralatan *flow meter liquid*. Berdasarkan hasil pengukuran diperoleh grafik hasil kalibrasi *flow meter liquid* yang ditunjukkan pada 1Tabel A.1 dan Gambar A. berikut :

**Tabel A.1** Laju alir *liquid* yang telah dikalibrasi

No.	Pembacaan <i>flow meter</i> (mL/menit)	Laju alir sebenarnya (mL/menit)
1	500	546
2	400	423
3	300	276
4	200	236
5	100	114



**Gambar A.1** Kalibrasi *flow meter liquid*

Sehingga didapatkan persamaan kalibrasi *flow meter liquid* berdasarkan Gambar A.1 adalah  $y = 1,051x + 3,7$

## A.2 Luas kontak gas-liquid

A = luas selimut silinder bagian dalam, karena luas kontak gas-liquid terjadi pada permukaan dalam membran *hollow fiber*.

- Modul A :

$$d_i = 0,35 \text{ mm} = 3,5 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$L = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$$

$$n = \text{jumlah serat membran} = 3302$$

$$\varepsilon = \text{porositas membran} = 0,65$$

$$A = 2 \times \pi \times \left(\frac{1}{2} d_i\right) \times L \times n \times \varepsilon$$

$$A = \pi \times d_i \times L \times n \times \varepsilon$$

$$A = \pi \times (3,5 \times 10^{-4}) \times (0,2) \times 3302 \times 0,65$$

$$A = 0,472186 \text{ m}^2$$

- Modul B :

$$d_i = 0,35 \text{ mm} = 3,5 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$L = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$$

$$n = \text{jumlah serat membran} = 6500$$

$$\varepsilon = \text{porositas membran} = 0,65$$

$$A = 2 \times \pi \times \left(\frac{1}{2} d_i\right) \times L \times n \times \varepsilon$$

$$A = \pi \times d_i \times L \times n \times \varepsilon$$

$$A = \pi \times (3,5 \times 10^{-4}) \times (0,3) \times 6500 \times 0,65$$

$$A = 1,3943 \text{ m}^2$$

## A.3 Analisa titrasi chittic untuk sales gas absorpsi

Data hasil percobaan untuk pelarut DEA-PZ pada laju alir pelarut 500 mL/menit:

$$\text{Vol HCl mula – mula} = 9,2$$

$$\text{Vol HCl akhir} = 8,4$$

$$\begin{aligned} \text{Vol HCl dibutuhkan} &= \text{Vol HCl akhir} - \text{Vol HCl mula – mula} \\ &= 0,95 \end{aligned}$$

$$\text{Vol gas} = 13,5$$

$$\begin{aligned} \text{Vol CO}_2 &= \text{Vol gas} - \text{Vol HCl dibutuhkan} \\ &= 12,65 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Massa CO}_2 \text{ di sales gas} &= \text{Vol HCl dibutuhkan} \times \text{BM}_{\text{CO}_2} \times [\text{HCl}] \\
&= 0,95 \text{ mL} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times 44,01 \frac{\text{gram}}{\text{mol}} \times 0,835 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \\
&= 0,0312 \text{ gram} \\
\text{Volume CO}_2 \text{ di sales gas} &= \frac{\text{massa CO}_2 \text{ di sales gas}}{\rho_{\text{CO}_2}} \\
&= \frac{0,0312 \text{ gram}}{1,98 \frac{\text{gram}}{\text{L}}} \times \frac{1000 \text{ mL}}{\text{L}} \\
&= 15,7664 \text{ mL}
\end{aligned}$$

#### A.4 Analisa titrasi chittic untuk *rich solvent* dan *lean solvent* desorpsi

$$\text{Kondisi operasi} : P = 101,325 \text{ Pa}$$

$$T = 303,15 \text{ K}$$

$$\text{Kondisi ditetapkan} : C_1 = 2,9318 \text{ mol/L}$$

$$V_1 = 2 \text{ mL}$$

Data hasil percobaan untuk pelarut DEA-PZ pada laju alir pelarut 100 mL/menit:

$$\text{Vol HCl mula – mula} = 44,2$$

$$\text{Vol HCl akhir} = 47,2$$

$$\begin{aligned}
\text{Vol HCl dibutuhkan} &= \text{Vol HCl akhir} - \text{Vol HCl mula – mula} \\
&= 3,1
\end{aligned}$$

$$\text{Vol gas} = 26$$

Dimana :

$V_{\text{gas}}$  : perubahan volume larutan NaCl yang pada *measuring burette* (mL)

$V_{\text{HCl}}$  : volume HCl yang diperlukan (mL)

$P$  : tekanan atmosfer (Pa)

$T$  : suhu ruangan (K)

$C_1$  : konsentrasi pelarut (mol/L)

$V_1$  : volume sampel pelarut (mL).

$$\alpha = \frac{\text{mol}(CO_2)}{\text{mol}(\text{pelarut})} = \left[ \frac{(V_{gas} - V_{HCl})(P)(273K)}{(101325 Pa)(T)(22,4L/mol)} \right]$$

$$\alpha = \frac{(26 - 3,1) \times 101,325 \times 273}{101325 \times 303,15 \times 22,4}$$

$$\alpha = 0,1571$$

#### A.5 Perhitungan fluks absorpsi

Data hasil percobaan untuk pelarut DEA-PZ pada laju alir pelarut 500 mL/menit :

$$Q_{in} = 600 \text{ mL/menit} = 10 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{jam}$$

$$Q_{out} = 450 \text{ mL/menit} = 7,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{jam}$$

$$\text{Konsentrasi } CO_2 \text{ masuk} = 40,89 \% \text{ vol}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume } CO_2 \text{ masuk} &= 40,89 \% \text{ vol} \times 600 \text{ mL/menit} \\ &= 245,34 \text{ mL/menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa } CO_2 \text{ masuk} &= 245,34 \text{ mL/menit} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times \rho_{CO_2} \\ &= 0,4858 \text{ gram/menit} \end{aligned}$$

$$\text{Mol } CO_2 \text{ masuk} = \frac{\text{massa } CO_2 \text{ masuk}}{BM_{CO_2}}$$

$$\begin{aligned} \text{Mol } CO_2 \text{ masuk} &= \frac{0,4858 \frac{\text{gram}}{\text{menit}}}{44,01 \frac{\text{gram}}{\text{mol}}} \\ &= 0,01104 \frac{\text{mol}}{\text{menit}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{in} &= \frac{\text{mol } CO_2 \text{ masuk}}{\frac{Q_{in}}{1000000}} \\ &= \frac{0,01104 \frac{\text{mol}}{\text{menit}}}{\frac{600 \frac{\text{mL}}{\text{menit}}}{1000000}} \\ &= 18,396 \text{ mol/m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Volume } CO_2 \text{ di sales gas} = 15,7664 \text{ mL}$$

$$\text{Massa } CO_2 \text{ di sales gas} = 0,0312 \text{ gram}$$

$$\text{Mol } CO_2 \text{ di sales gas} = \frac{\text{massa } CO_2 \text{ di sales gas}}{BM_{CO_2}}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Mol CO}_2 \text{ di sales gas} &= \frac{0,0312 \frac{\text{gram}}{\text{menit}}}{44,01 \frac{\text{gram}}{\text{mol}}} \\
 &= 0,00070893 \frac{\text{mol}}{\text{menit}} \\
 C_{\text{out}} &= \frac{\frac{\text{mol CO}_2 \text{ masuk}}{Q_{\text{in}}}}{\frac{1000000}{1000000}} \\
 &= \frac{0,00070893 \frac{\text{mol}}{\text{menit}}}{\frac{600 \frac{\text{mL}}{\text{menit}}}{1000000}} \\
 &= 1,1815 \text{ mol/m}^3
 \end{aligned}$$

$$Q_{l,\text{out}} = 450 \text{ ml/min}$$

$$T_g = 30^\circ\text{C} = 303,15 \text{ K}$$

$$A = 0,472186 \text{ m}^2$$

Dimana :

$Q_{\text{in}}$  dan  $Q_{\text{out}}$  : laju alir gas CO<sub>2</sub> masuk dan laju alir gas CO<sub>2</sub> keluar (m<sup>3</sup>/s)

$C_{\text{in}}$  dan  $C_{\text{out}}$  : konsentrasi *inlet* dan *outlet* dari gas CO<sub>2</sub> (mol/m<sup>3</sup>)

$Q_{l,\text{in}}$  dan  $Q_{l,\text{out}}$  : laju alir pelarut (m<sup>3</sup>/s).

$T_g$  : suhu lingkungan (°C)

$A$  : luas kontak gas-liquid (m<sup>2</sup>)

Fluks absorpsi :

$$\begin{aligned}
 J_{\text{CO}_2} &= \frac{(Q_{\text{in}} \times C_{\text{in}}) - (Q_{\text{out}} \times C_{\text{out}})}{A} \\
 &= \frac{(10 \times 10^{-6} \times 18,396) - (7,5 \times 10^{-6} \times 1,1815)}{0,4722} \\
 &= 3,25 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2\text{s}
 \end{aligned}$$

Jadi, fluks absorpsi adalah sebesar  $3,25 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2\text{s}$ .

## A.6 Perhitungan fluks desorpsi

Data hasil percobaan untuk pelarut DEA-PZ pada laju alir pelarut 100 mL/menit:

$$\alpha_R = 0,2407 \text{ mol CO}_2/\text{mol pelarut}$$

$$\alpha_L = 0,1617 \text{ mol CO}_2/\text{mol pelarut}$$

$$Q_R = 100 \text{ mL/menit}$$

$$Q_L = 65 \text{ mL/menit}$$



$$M_R = 2,9318 \text{ mol/L}$$

$$M_L = 1,2726 \text{ mol/L}$$

$$A = 0,472186 \text{ m}^2$$

dimana :  $N_{\text{CO}_2}$  = fluks desorpsi dalam ( $\text{mol/m}^2\text{s}$ )

$\alpha_R$  dan  $\alpha_L$  =  $\text{CO}_2$  loading pada pelarut masuk dan keluar desorber ( $\text{mol CO}_2/\text{mol pelarut}$ )

$Q_R$  dan  $Q_L$  = laju alir pelarut masuk dan keluar desorber ( $\text{mL/menit}$ )

$M_R$  dan  $M_L$  = konsentrasi pelarut masuk dan keluar desorber ( $\text{mol/L}$ )

$A$  = luas kontak gas-liquid ( $\text{m}^2$ )

Fluks desorpsi :

$$N_{\text{CO}_2} = \frac{(Q_R \times \alpha_R \times M_R) - (Q_L \times \alpha_L \times M_L)}{6 \times 10^4 \times A}$$

$$N_{\text{CO}_2} = \frac{(100 \times 0,2407 \times 2,9318) - (65 \times 0,1617 \times 1,2726)}{6 \times 10^4 \times 0,472186}$$

$$N_{\text{CO}_2} = 0,00193 \text{ mol/m}^2\text{s} = 1,93 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^2\text{s}$$

Jadi, fluks desorpsi adalah sebesar  $1,93 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^2\text{s}$ .

#### A.7 Perhitungan % $\text{CO}_2$ removal absorpsi

$$\eta = \frac{Q_{in} \times C_{in} - Q_l \times C'_{out}}{Q_{in} \times C_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{400 \times 33,53 - 600 \times 8}{400 \times 33,53} \times 100\%$$

$$\eta = 63,64\%$$

#### A.8 Perhitungan % efisiensi desorpsi

$$\eta = \frac{(Q_R \times \alpha_R \times M_R - Q_L \times \alpha_L \times M_L)}{Q_R \times \alpha_R \times M_R} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{(100 \times 0,2407 \times 2,9318 - 65 \times 0,1612 \times 1,2726)}{100 \times 0,2407 \times 2,9318} \times 100\%$$

$$\eta = 81,1\%$$

### A.9 Perhitungan Bilangan Reynold untuk masing – masing laju alir pelarut

$$Re = \frac{\rho \times d \times v_l}{\mu}$$

data diketahui :  $d_i$  = diameter dalam *hollow fiber*

➤ Data properties pelarut DEA pada T = 343,15 K :

**Tabel A.2** Nilai viskositas ( $\mu$ ) dan densitas ( $\rho$ ) untuk pelarut DEA dan DEA + aktivator

Pelarut	$\mu$ (Pa.s)	$\rho$ (g/mL)
DEA	0,03379	1028
DEA-PZ	0,04123	1025
DEA-Arg	0,04123	1021
DEA-MSG	0,04123	1030

➤ Data properties pelarut MDEA pada T = 343,15 K :

**Tabel A.2** Nilai viskositas ( $\mu$ ) dan densitas ( $\rho$ ) untuk pelarut MDEA dan MDEA + aktivator

Pelarut	$\mu$ (Pa.s)	$\rho$ (g/mL)
MDEA	0,01107	998,7
MDEA-PZ	0,0156	995,8
MDEA-MSG	0,01202	1004,25

Contoh perhitungan untuk pelarut DEA pada laju alir 100 mL/menit :

- $Q_{L,in}$  = laju alir pelarut (*flow rate*) masuk = 100 mL/menit
- $V_{L,in}$  = kecepatan (*velocity*) masuk

$$\begin{aligned}
 &= 100 \frac{mL}{menit} \times \frac{1 \text{ menit}}{60 \text{ detik}} \times \frac{1 m^3}{10^6 mL} \times 0,472186 m^2 \\
 &= 3,53 \times 10^{-6} m/s
 \end{aligned}$$

- $Re = \frac{\rho \times d \times v_l}{\mu}$

$$Re = \frac{1028 \frac{g}{mL} \times 0,00035 m \times 3,53 \times 10^{-6} \frac{m}{s}}{0,03379 Pa.s}$$

$$Re = 0,0376$$

#### A.10 Perhitungan koefisien perpindahan massa CO<sub>2</sub>

Jika dihitung berdasarkan data percobaan, hambatan perpindahan massa total dapat dituliskan sebagai berikut :

$$K_{OL} = \frac{N_{CO_2}}{\Delta C_{CO_2}}$$

dimana  $N_{CO_2}$  adalah fluks desorpsi

$$N_{CO_2} = \frac{(Q_R \times \alpha_R \times M_R - Q_L \times \alpha_L \times M_L)}{6 \times 10^4 \times A}$$

dan  $\Delta C_{CO_2}$  adalah konsentrasi CO<sub>2</sub> rata – rata logaritmik yang dirumuskan sebagai berikut :

$$\Delta C_{CO_2} = \frac{(C_{in} - C_{in}^*) - (C_{out} - C_{out}^*)}{\ln \left[ \frac{(C_{in} - C_{in}^*)}{(C_{out} - C_{out}^*)} \right]}$$

$C_{in}$  dan  $C_{out}$  = konsentrasi CO<sub>2</sub> di dalam pelarut masuk dan keluar modul membran desorpsi (mol/L)

$C_{in}^*$  dan  $C_{out}^*$  = konsentrasi CO<sub>2</sub> pada saat kesetimbangan di dalam pelarut masuk dan keluar modul membran desorpsi (mol/L)

$$C_{in}^* = C_{CO_2,in} \times H$$

$$C_{out}^* = C_{CO_2,out} \times H$$

Pada penelitian ini, tekanan parsial CO<sub>2</sub> diasumsi sangat kecil, sehingga  $C_{CO_2,in}$  dan  $C_{CO_2,out}$  menjadi sangat kecil dan  $C_{in}^*$  dan  $C_{out}^*$  bernilai nol.

contoh perhitungan untuk DEA-PZ pada laju alir pelarut 100 mL/menit :

- $N_{CO_2} = 0,00142 \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s}$ .
- $C_{in} = M_R \times \alpha_R$   
 $= 2,9381 \text{ mol/L} \times 0,2407 \text{ mol CO}_2/\text{mol pelarut}$   
 $= 0,6804 \text{ mol CO}_2/\text{L}$
- $C_{out} = M_L \times \alpha_L$   
 $= 1,2726 \text{ mol/L} \times 0,1617 \text{ mol CO}_2/\text{mol pelarut}$   
 $= 0,2025 \text{ mol CO}_2/\text{L}$

- Menghitung  $\Delta C_{CO_2}$  :

$$\Delta C_{CO_2} = \frac{(C_{in} - C_{in}^*) - (C_{out} - C_{out}^*)}{\ln \left[ \frac{C_{in} - C_{in}^*}{C_{out} - C_{out}^*} \right]}$$

$$\Delta C_{CO_2} = \frac{(0,6804 - 0) - (0,2025 - 0)}{\ln \frac{(0,6804 - 0)}{(0,2025 - 0)}}$$

$$\Delta C_{CO_2} = \frac{0,4779}{\ln \frac{(0,6804)}{(0,2025)}}$$

$$\Delta C_{CO_2} = 0,3964 \text{ mol/m}^3$$

- Sehingga ,

$$K_{OL} = \frac{N_{CO_2}}{\Delta C_{CO_2}}$$

$$K_{OL} = \frac{0,00142 \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}}{0,3964 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}}$$

$$K_{OL} = 0,0087 \text{ m/s}$$

### A.11 Konstantan Henry CO<sub>2</sub> dalam DEA

Menentukan H<sub>CO<sub>2</sub></sub> dalam larutan DEA tidak didapatkan secara langsung, karena CO<sub>2</sub> bereaksi dalam fase liquid. Maka dari itu digunakan analogi N<sub>2</sub>O

$$H_{CO_2} = H_{N_2O} (H_{CO_2}/H_{N_2O})_{in\ water} \quad (\text{Benamor, dkk. 2008})$$

diketahui H<sub>CO<sub>2</sub></sub> dan H<sub>N<sub>2</sub>O</sub> dalam air adalah :

$$H_{CO_2} = 2.82 \cdot 10^6 \exp(-2044/T)$$

$$H_{N_2O} = 8.55 \cdot 10^6 \exp(-2284/T) \quad (\text{Benamor, dkk. 2008})$$

dimana dalam penelitian ini, suhu dan konsentrasi pelarut DEA adalah :

$$T = 70 \quad ^\circ\text{C} = 343,15 \quad \text{K}$$

$$C_{\text{DEA}} = 2,933 \quad \text{mol/L}$$

data H<sub>N<sub>2</sub>O-DEA</sub> dari literatur Rinker dan Sandall 1996 untuk konsentrasi DEA 30% wt.

T (K)	H <sub>N<sub>2</sub>O-DEA</sub> (Mpa m <sup>3</sup> /kmol)
293	4,241
313	6,795
333	9,526
343,15	10,863
353	12,2

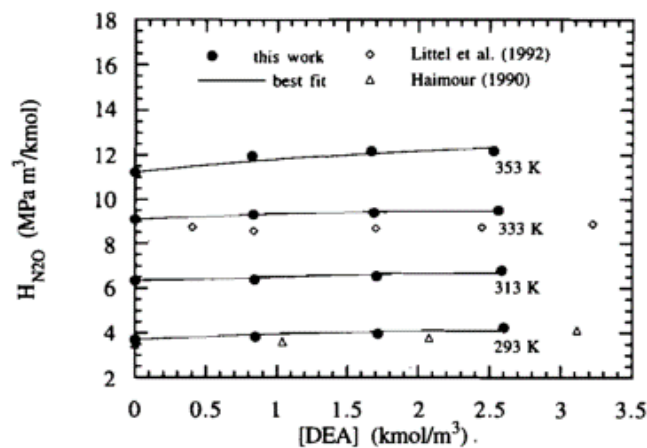


FIGURE 2 Henry's law constants for N<sub>2</sub>O in aqueous solutions of 0–30 mass % DEA.

$$\begin{aligned} H_{CO_2-water} &= 2,82 \times 10^6 \exp\left(\frac{-2044}{343,15}\right) \\ &= 7300,285145 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{N_2O-water} &= 8,55 \times 10^6 \exp\left(\frac{-2284}{342,15}\right) \\ &= 3280,078283 \end{aligned}$$

$$H_{CO_2} = H_{N_2O} (H_{CO_2}/H_{N_2O})_{in\ water}$$

$$H_{CO_2-DEA} = 10,863 \left( \frac{7174,292}{3216,886} \right)$$

$$= 0,024177166 \text{ kPa/m}^3 \cdot \text{kmol}$$

### A.12 Difusivitas CO<sub>2</sub> dalam DEA

Terdapat reaksi kimia antara CO<sub>2</sub> dan DEA, dimana difusivitas CO<sub>2</sub> dalam DEA dapat dihitung berdasarkan analogi difusivitas N<sub>2</sub>O dalam DEA.

$$D_{CO_2} = D_{N_2O} (D_{CO_2}/D_{N_2O})_{in\ water} \quad (\text{Benamor, dkk. 2008})$$

diketahui H<sub>CO2</sub> dan H<sub>N2O</sub> dalam air adalah :

$$D_{CO_2} = 2.35 \cdot 10^{-6} \exp(-2119/T) \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$D_{N_2O} = 5.07 \cdot 10^{-6} \exp(-2371/T) \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{Benamor, dkk. 2008})$$

$$D_{CO_2-air} = 2,35 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-2119}{343,15}\right) \quad D_{N_2O-air} = 5,07 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-2371}{343,15}\right)$$

$$D_{CO_2-air} = 4,8892\text{E-}09 \text{ m}^2/\text{s} \quad D_{N_2O-air} = 5,06109\text{E-}09 \text{ m}^2/\text{s}$$

Dari penelitian Ko, Jiun-Jie, dkk. 2001. persamaan H<sub>N2O</sub> di dalam DEA dapat dituliskan :

$$D_{N_2O-DEA} = [5,07 + 2,17C_{DEA} + 2,29C_{DEA}^2] \times 10^{-6} \times \exp\left[\frac{-2371 - 292C_{DEA}}{T}\right]$$

dimana dalam penelitian ini, suhu dan konsentrasi pelarut DEA adalah :

$$T = 70 \quad ^\circ\text{C} = 343,15 \quad \text{K}$$

$$C_{DEA} = 2,933 \quad \text{mol/L}$$

$$D_{N_2O-DEA} = [5,07 + 2,17(2,933) + 2,29(2,933)^2] \times 10^{-6} \times \exp\left[\frac{-2371 \times -292}{343,15}\right]$$

$$D_{N_2O-DEA} = 2,562\text{E-}09 \text{ m}^2/\text{s}$$

sehingga :

$$D_{CO_2-DEA} = D_{N_2O} \left( \frac{D_{CO_2}}{D_{N_2O}} \right)_{in\ water}$$

$$D_{CO_2-DEA} = 2,562 \times 10^{-9} \left( \frac{4,8892 \times 10^{-9}}{5,06109 \times 10^{-9}} \right)_{in\ water}$$

$$D_{CO_2-DEA} = 2,4749\text{E-}09 \text{ m}^2/\text{s}$$

### A.13 Difusivitas molekular CO<sub>2</sub> dalam gas

$$D_{g,m} = \frac{4,36 \times 10^{-5} T^{1,5} \left( \frac{1}{M_{CO_2}} + \frac{1}{M_{CO_2}} \right)^{0,5}}{P(V_{CO_2}^{1/3} + V_{CO_2}^{1/3})}$$

dimana :

$$\begin{aligned} M_{CO_2} &= 44,01 \text{ g/mol} \\ V_{CO_2} &= 22,4 \text{ L/mol} \\ T &= 343,15 \text{ K} \\ P &= 101,325 \text{ kPa} \end{aligned}$$

sehingga :  $D_{g,m} = 1,03E-04 \text{ m}^2/\text{s}$

#### A.14 Koefisien Difusivitas Efektiv Gas ke dalam Pori Membran ( $D_{g,eff}$ )

$$\frac{1}{D_{g,eff}} = \frac{1}{D_{g,m}} + \frac{1}{D_{g,kn}}$$

dimana :  $D_{g,kn} = 48,5d_p \left( \frac{T_G}{M} \right)^{0,5}$  ;  $d_p = 0,00035 \text{ m}$

$$D_{g,kn} = 0,047399755 \text{ m}^2/\text{s}$$

sehingga :

$$\begin{aligned} \frac{1}{D_{g,eff}} &= \frac{1}{D_{g,m}} + \frac{1}{D_{g,kn}} \\ \frac{1}{D_{g,eff}} &= \frac{1}{1,03 \times 10^{-5}} + \frac{1}{0,0474} \end{aligned}$$

$$D_{g,eff} = 1,032E-04 \text{ m}^2/\text{s}$$

#### A.15 Difusivitas DEA dalam larutan DEA

Snijder, dkk (1993) menggunakan teknik dispersi untuk menghitung koefisien difusi dari beberapa jen alkanolamina, termasuk DEA. Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$D_{DEA-DEA \text{ solution}} = \exp \left( -13,268 - \frac{2287,7}{T} - 19,699 \times 10^{-5} C_{DEA} \right)$$

dimana dalam penelitian ini, suhu dan konsentrasi pelarut DEA adalah :

$$\begin{aligned} T &= 70 \text{ } ^\circ\text{C} = 343,15 \text{ K} \\ C_{DEA} &= 2,933 \text{ mol/L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{DEA-DEA \text{ solution}} &= \exp \left( -13,268 - \frac{2287,7}{343,15} - 19,699 \times 10^{-5} (2,933) \right) \\ &= 2,19883E-09 \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

## A.16 Konstantan Henry CO<sub>2</sub> dalam MDEA

Menentukan H<sub>CO<sub>2</sub></sub> dalam larutan MDEA tidak didapatkan secara langsung, maka dari itu digunakan analogi N<sub>2</sub>O

$$H_{CO_2} = H_{N_2O} (H_{CO_2}/H_{N_2O})_{in\ water} \quad (\text{Benamor, dkk. 2008})$$

diketahui H<sub>CO<sub>2</sub></sub> dan H<sub>N<sub>2</sub>O</sub> dalam air adalah :

$$H_{CO_2} = 2.82 \cdot 10^6 \exp(-2044/T)$$

$$H_{N_2O} = 8.55 \cdot 10^6 \exp(-2284/T) \quad (\text{Benamor, dkk. 2008})$$

dimana dalam penelitian ini, suhu dan konsentrasi pelarut DEA adalah :

$$T = 70 \quad ^\circ\text{C} = 343,15 \quad \text{K}$$

$$CM_{DEA} = 2,534 \quad \text{mol/L}$$

data H<sub>N<sub>2</sub>O</sub>-MDEA dari literatur Rinker dan Sandall 1996 untuk konsentrasi MDEA 30% wt.

T (K)	H <sub>N<sub>2</sub>O</sub> -MDEA (Mpa m <sup>3</sup> /kmol)
293	4,433
313	7,02
333	9,225
343,15	10,442
353	11,66

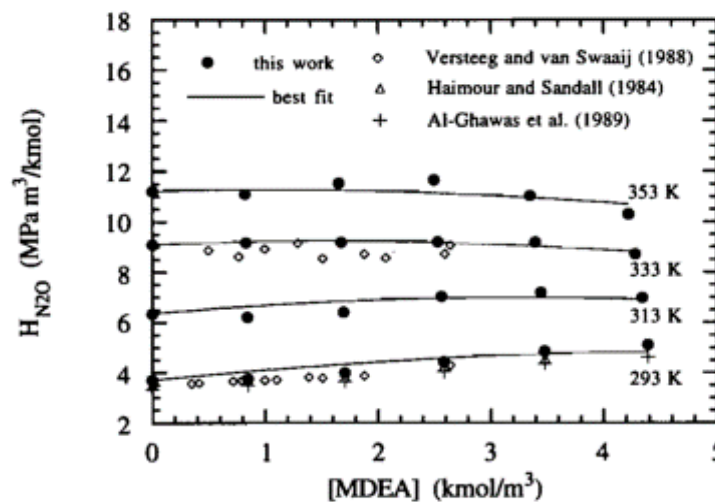


FIGURE 1 Henry's law constants for N<sub>2</sub>O in aqueous solutions of 0–50 mass % MDEA.

$$\begin{aligned} H_{CO_2-water} &= 2,82 \times 10^6 \exp\left(\frac{-2044}{343,15}\right) \\ &= 7300,285145 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{N_2O-water} &= 8,55 \times 10^6 \exp\left(\frac{-2284}{342,15}\right) \\ &= 3280,078283 \end{aligned}$$



$$H_{CO_2} = H_{N_2O} (H_{CO_2}/H_{N_2O})_{in\ water}$$

$$\begin{aligned} H_{CO_2-MDEA} &= 10,442 \left( \frac{7174,292}{3216,886} \right) \\ &= 0,02324 \text{ kPa/m}^3 \cdot \text{kmol} \end{aligned}$$

### A.17 Difusivitas CO<sub>2</sub> dalam MDEA

Terdapat reaksi kimia antara CO<sub>2</sub> dan MDEA, dimana difusivitas CO<sub>2</sub> dalam MDEA dapat dihitung berdasarkan analogi difusivitas N<sub>2</sub>O dalam MDEA.

$$D_{CO_2} = D_{N_2O} (D_{CO_2}/D_{N_2O})_{in\ water} \quad (\text{Benamor, dkk. 2008})$$

diketahui H<sub>CO2</sub> dan H<sub>N2O</sub> dalam air adalah :

$$D_{CO_2} = 2.35 \cdot 10^{-6} \exp(-2119/T) \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$D_{N_2O} = 5.07 \cdot 10^{-6} \exp(-2371/T) \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{Benamor, dkk. 2008})$$

$$\begin{aligned} D_{CO_2-air} &= 2,35 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-2119}{343,15}\right) & D_{N_2O-air} &= 5,07 \times 10^{-6} \exp\left(\frac{-2371}{343,15}\right) \\ D_{CO_2-air} &= 4,8892\text{E-}09 \text{ m}^2/\text{s} & D_{N_2O-air} &= 5,06109\text{E-}09 \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

Dari penelitian Ko, Jiun-Jie, dkk. 2001. persamaan H<sub>N2O</sub> di dalam MDEA dapat dituliskan :

$$D_{N_2O-MDEA} = [5,07 + 1,31C_{DEA} + 0,0873C_{DEA}^2] \times 10^{-6} \times \exp\left[\frac{-2371 - 150C_{DEA}}{T}\right]$$

dimana dalam penelitian ini, suhu dan konsentrasi pelarut DEA adalah :

$$T = 70 \quad ^\circ\text{C} = 343,15 \quad \text{K}$$

$$C_{DEA} = 2,534 \quad \text{mol/L}$$

$$\begin{aligned} D_{N_2O-MDEA} &= [5,07 + 1,31(2,534) + 0,0873(2,534)^2] \times 10^{-6} \times \exp\left[\frac{-2371 \times -150}{343,15}\right] \\ D_{N_2O-MDEA} &= 2,951\text{E-}09 \quad \text{m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

sehingga :

$$\begin{aligned} D_{CO_2-MDEA} &= D_{N_2O} \left( \frac{D_{CO_2}}{D_{N_2O}} \right)_{in\ water} \\ D_{CO_2-MDEA} &= 2,951 \times 10^{-9} \left( \frac{4,8892 \times 10^{-9}}{5,06109 \times 10^{-9}} \right)_{in\ water} \\ D_{CO_2-MDEA} &= 2,8510\text{E-}09 \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

### A.18 Difusivitas MDEA dalam larutan MDEA

Snijder, dkk (1993) menggunakan teknik dispersi untuk menghitung koefisien difusi dari beberapa jenis alkanolamina, termasuk MDEA. Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$D_{MDEA-MDEA\ solution} = \exp\left(-13,088 + \frac{2360,7}{T} - 24,727 \times 10^{-5} C_{MDEA}\right)$$

dimana dalam penelitian ini, suhu dan konsentrasi pelarut MDEA adalah :

$$T = 70 \quad ^\circ\text{C} = 343,15 \quad \text{K}$$

$$C_{\text{MDEA}} = 2,534 \text{ mol/L}$$

$$D_{\text{MDEA-MDEA solution}} = \exp\left(-13,268 + \frac{2360,7}{343,15} - 24,727 \times 10^{-5}(2,534)\right)$$

$$= 2,011\text{E-}03 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_{g,m} = \frac{4,36 \times 10^{-5} T^{1,5} \left( \frac{1}{M_{\text{CO}_2}} + \frac{1}{M_{\text{CO}_2}} \right)^{0,5}}{P(V_{\text{CO}_2}^{1/3} + V_{\text{CO}_2}^{1/3})}$$

dimana :

$$M_{\text{CO}_2} = 44,01 \text{ g/mol}$$

$$V_{\text{CO}_2} = 22,4 \text{ L/mol}$$

$$T = 343,15 \text{ K}$$

$$P = 101,325 \text{ kPa}$$

sehingga :  $D_{g,m} = 1,03\text{E-}04 \text{ m}^2/\text{s}$

### A.19 Perhitungan hambatan dan koefisien perpindahan massa di bagian membran

- (i) mencari koefisien perpindahan massa di bagian membran

\* membran tidak terbasahi

$$\frac{1}{k_M} = \frac{\tau \delta}{D_{g,eff} \epsilon}$$

$$\frac{1}{k_M} = \frac{2,3669 \times 0,00035}{1,034 \times 10^{-5} \times 0,65}$$

data diketahui :

$$\tau = 2,3669$$

$$\delta = 0,00035 \text{ m}$$

$$\epsilon = 0,65$$

$$D_{g,eff} = 1,032\text{E-}04 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\frac{1}{k_M} = \frac{0,000828}{6,708\text{E-}05}$$

$$k_M = 8,097\text{E-}02 \text{ m/s}$$

\* membran terbasahi sebagian

$$\frac{1}{k_m} = \frac{\tau \delta \beta}{D_{CO2,L} \epsilon} + \frac{(1 - \beta) \tau \delta}{D_{g,eff} \epsilon}$$

$$\frac{1}{k_M} = \frac{2,3669 \times 0,00035 \times 0,37}{2,47 \times 10^{-9} \times 0,65} + \frac{(1 - 0,37) 2,3669 \times 0,00035}{1,035 \times 10^{-5} \times 0,65}$$

$$k_M = 5,25\text{E-}06 \text{ m/s}$$

diketahui:

$$\tau = 2,3669$$

$$\delta = 0,00035 \text{ m}$$

$$\epsilon = 0,65$$

$$\beta = 0,37$$

$$D_{g,eff} = 1,032\text{E-}04 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_{CO2,L} = 2,47\text{E-}09 \text{ m}^2/\text{s}$$

## LAMPIRAN B

### DATA HASIL PENELITIAN DAN PERHITUNGAN

#### B.1 Hasil perhitungan fluks dan %CO<sub>2</sub> removal absorpsi untuk pelarut DEA

Fluks absorpsi dan %CO<sub>2</sub> removal dihitung menggunakan persamaan yang digunakan oleh Lv, dkk. (2012) :

$$J_{CO_2} = \frac{(Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out})}{A} \quad \eta = \frac{(Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out})}{Q_{in} \times C_{in}} \times 100\%$$

dimana  $J_{CO_2}$  adalah fluks absorpsi dalam (mol/m<sup>2</sup>s),  $Q_{in}$  dan  $Q_{out}$  adalah aju alir gas CO<sub>2</sub> masuk dan keluar absorber (m<sup>3</sup>/s),  $C_{in}$  dan  $C_{out}$  adalah konsentrasi inlet dan outlet dari gas CO<sub>2</sub> (mol/m<sup>3</sup>), dan A adalah luas kontak gas dan liquid (m<sup>2</sup>).

data – data diketahui atau ditetapkan :

- A = 0,472186 m<sup>2</sup>
- Q<sub>CO<sub>2</sub>,in</sub> = 600 mL/menit
- C<sub>CO<sub>2</sub>,in</sub> = 40% volume
- P<sub>operasi</sub> = 1,5 bar (absolut)
- T<sub>operasi</sub> = 31° C

Hasil perhitungan untuk berbagai jenis pelarut DEA dan DEA + aktivator disajikan dalam **Tabel B.1** berikut :

**Tabel B.1** Hasil perhitungan fluks absorpsi dan %CO<sub>2</sub> removal untuk pelarut DEA

DEA [HCl] = 0,8345 N									
Q <sub>L,in</sub> (mL/min)	Q <sub>L,out</sub> (ml/min)	Q <sub>G,out</sub> (ml/min)	CO <sub>2</sub> feed gas		CO <sub>2</sub> sales gas		Fluks abs. (mol/m <sup>2</sup> .s)	Efisiensi (%)	C <sub>g,out</sub> (%)
			m (gram)	vol (mL)	m (gram)	vol (mL)			
100	80	450	0,4858	245,34	0,2589	130,77	0,000162	46,699	29,060
200	180	450	0,4858	245,34	0,2406	121,49	0,000175	50,479	26,999
300	285	450	0,4858	245,34	0,2350	118,71	0,000179	51,614	26,380
400	390	475	0,4858	245,34	0,2222	112,22	0,000188	54,260	23,625
500	450	475	0,4858	245,34	0,2204	111,29	0,000190	54,638	23,430
DEA - PZ [HCl] = 0,8345 N									
Q <sub>L,in</sub> (mL/min)	Q <sub>L,out</sub> (ml/min)	Q <sub>G,out</sub> (ml/min)	CO <sub>2</sub> feed gas		CO <sub>2</sub> sales gas		Fluks abs. (mol/m <sup>2</sup> .s)	Efisiensi (%)	C <sub>g,out</sub> (%)
			m (gram)	vol (mL)	m (gram)	vol (mL)			
100	80	450	0,4858	245,34	0,0643	32,4602	0,000301	86,7693	7,2134
200	190	450	0,4858	245,34	0,0533	26,8956	0,000309	89,0374	5,9768
300	280	450	0,4858	245,34	0,0422	21,3310	0,000317	91,3056	4,7402
400	390	450	0,4858	245,34	0,0349	17,6212	0,000322	92,8176	3,9158
500	450	450	0,4858	245,34	0,0312	15,7664	0,000325	93,5737	3,5036

(lanjutan) **Tabel B.1** Hasil perhitungan fluks absorpsi dan %CO<sub>2</sub> removal untuk pelarut DEA

DEA - Arginin [HCl]= 0,7271 N									
Q <sub>L,in</sub> (mL/min)	Q <sub>L,out</sub> (ml/min)	Q <sub>G,out</sub> (ml/min)	CO <sub>2</sub> feed gas		CO <sub>2</sub> sales gas		Fluks abs. (mol/m <sup>2</sup> .s)	Efisiensi (%)	C <sub>g,out</sub> (%)
			m (gram)	vol (mL)	m (gram)	vol (mL)			
100	80	450	0,4858	245,34	0,1200	60,605	0,000261	75,2974	13,468
200	160	450	0,4858	245,34	0,1168	58,989	0,000264	75,9561	13,109
300	250	450	0,4858	245,34	0,1056	53,333	0,000272	78,2617	11,852
400	350	450	0,4858	245,34	0,0928	46,868	0,000281	80,8966	10,415
500	450	450	0,4858	245,34	0,0816	41,212	0,000289	83,2022	9,158
DEA - MSG [HCl] = 0,7271 N									
Q <sub>L,in</sub> (mL/min)	Q <sub>L,out</sub> (ml/min)	Q <sub>G,out</sub> (ml/min)	CO <sub>2</sub> feed gas		CO <sub>2</sub> sales gas		Fluks abs. (mol/m <sup>2</sup> .s)	Efisiensi (%)	C <sub>g,out</sub> (%)
			m (gram)	vol (mL)	m (gram)	vol (mL)			
100	80	450	0,4858	245,34	0,0720	36,3633	0,000296	85,178	8,0807
200	175	450	0,4858	245,34	0,0640	32,3229	0,000301	86,825	7,1829
300	250	450	0,4858	245,34	0,0624	31,5148	0,000303	87,155	7,0033
400	360	450	0,4858	245,34	0,0512	25,8583	0,000311	89,460	5,7463
500	450	450	0,4858	245,34	0,0496	25,0502	0,000312	89,790	5,5667

## B.2 Hasil perhitungan fluks dan efisiensi desorpsi untuk pelarut DEA

Fluks desorpsi dan efisiensi desorpsid dihitung menggunakan persamaan yang digunakan oleh Fang, dkk. (2012) :

$$N_{CO_2} = \frac{(Q_R \times \alpha_R \times M_R - Q_L \times \alpha_L \times M_L)}{6 \times 10^4 \times A}$$

$$\eta = \frac{(Q_R \times \alpha_R \times M_R - Q_L \times \alpha_L \times M_L)}{Q_R \times \alpha_R \times M_R} \times 100\%$$

dimana N<sub>CO2</sub> adalah fluks desorpsi dalam (mol/m<sup>2</sup>s), α<sub>R</sub> dan α<sub>L</sub> adalah CO<sub>2</sub> loading pada pelarut masuk dan keluar desorber (mol CO<sub>2</sub>/mol pelarut), Q<sub>R</sub> dan Q<sub>L</sub> adalah laju alir pelarut masuk dan keluar desorber (mL/menit), M<sub>R</sub> dan M<sub>L</sub> adalah konsentrasi pelarut masuk dan keluar desorber (mol/L), dan A adalah luas kontak gas-liquid (m<sup>2</sup>).

data – data diketahui atau ditetapkan :

- A = 0,472186 m<sup>2</sup>
- α<sub>R</sub> = 0,24 mol CO<sub>2</sub>/mol pelarut
- P<sub>vakum</sub> = 0,2 bar (gauge)
- T<sub>operasi</sub> = 70° C

Hasil perhitungan untuk berbagai jenis pelarut DEA dan DEA + aktivator disajikan dalam **Tabel B.2** berikut :

**Tabel B.2** Hasil perhitungan fluks dan efisiensi desorpsi untuk pelarut DEA

Pelarut	Q <sub>R</sub> (ml/min)	Q <sub>L</sub> (ml/min)	α <sub>in</sub>	α <sub>out</sub>	M <sub>R</sub>	M <sub>L</sub>	N <sub>CO2</sub> (mol/m <sup>2</sup> s)	Efisiensi (%)
DEA	100	70	0,2401	0,1786	2,933	2,42005	0,00142	57,03
	200	150	0,2401	0,1865		2,52436	0,00248	49,86
	300	255	0,2510	0,1961		2,44091	0,00349	44,72
	400	335	0,2434	0,1982		2,37833	0,00442	44,71
	500	450	0,2421	0,2002		2,73299	0,00480	30,63
DEA-PZ	100	65	0,2407	0,1612	2,9318	1,27261	0,00193	81,10
	200	156	0,2407	0,1701		1,46038	0,00344	72,54
	300	258	0,2407	0,1842		1,52296	0,00465	65,81
	400	355	0,2417	0,1955		1,58555	0,00576	61,18
	500	445	0,2417	0,1983		1,66900	0,00686	58,45
DEA-Arginin	100	80	0,2411	0,1395	2,8762	2,10711	0,00162	66,09
	200	175	0,2411	0,1500		2,08625	0,00296	60,52
	300	275	0,2411	0,1535		2,23229	0,00402	54,71
	400	350	0,2411	0,1626		2,23229	0,00531	54,21
	500	450	0,2411	0,1643		2,50350	0,00570	46,61
DEA - MSG	100	90	0,2423	0,1409	2,902	2,56609	0,00140	53,72
	200	175	0,2423	0,1500		2,58695	0,00257	51,71
	300	275	0,2423	0,1549		2,62868	0,00359	46,92
	400	375	0,2423	0,1535		2,67040	0,00451	45,35
	500	450	0,2423	0,1598		2,83730	0,00505	41,97

### B.3 Hasil perhitungan fluks dan %CO<sub>2</sub> removal absorpsi untuk pelarut MDEA

Fluks absorpsi dan %CO<sub>2</sub> removal dihitung menggunakan persamaan yang digunakan oleh

Lv, dkk. (2012) :

$$J_{CO_2} = \frac{(Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out})}{A} \quad \eta = \frac{(Q_{in} \times C_{in} - Q_{out} \times C_{out})}{Q_{in} \times C_{in}} \times 100\%$$

dimana J<sub>CO<sub>2</sub></sub> adalah fluks absorpsi dalam (mol/m<sup>2</sup>s), Q<sub>in</sub> dan Q<sub>out</sub> adalah aju alir gas CO<sub>2</sub> masuk dan keluar absorber (m<sup>3</sup>/s), C<sub>in</sub> dan C<sub>out</sub> adalah konsentrasi inlet dan outlet dari gas CO<sub>2</sub> (mol/m<sup>3</sup>), dan A adalah luas kontak gas dan liquid (m<sup>2</sup>).

data – data diketahui atau ditetapkan :

- $A = 1,39425 \text{ m}^2$
- $Q_{\text{CO}_2, \text{in}} = 600 \text{ mL/menit}$
- $C_{\text{CO}_2, \text{in}} = 40\% \text{ volume}$
- $P_{\text{operasi}} = 1,5 \text{ bar (absolut)}$
- $T_{\text{operasi}} = 31^\circ \text{ C}$

Hasil perhitungan untuk berbagai jenis pelarut MDEA dan MDEA + aktivator disajikan dalam **Tabel**

**B.3** berikut :

**Tabel B.3** Hasil perhitungan fluks absorpsi dan %CO<sub>2</sub> *removal* untuk pelarut MDEA

MDEA [HCl] = 0,8065 N									
$Q_{L, \text{in}}$	$Q_{L, \text{out}}$	$Q_{G, \text{out}}$	CO <sub>2</sub> feed gas		CO <sub>2</sub> sales gas		Fluks abs.	Efisiensi (%)	C <sub>g, out</sub> (%)
(mL/min)	(ml/min)	(ml/min)	m (gram)	vol (mL)	m (gram)	vol (mL)	(mol/m <sup>2</sup> .s)		
100	100	450	0,4858	245,34	0,2627	132,655	0,000054	45,930	29,479
200	200	450	0,4858	245,34	0,2556	129,069	0,000056	47,392	28,682
300	300	450	0,4858	245,34	0,2538	128,173	0,000056	47,757	28,483
400	400	450	0,4858	245,34	0,2485	125,484	0,000057	48,853	27,885
500	500	450	0,4858	245,34	0,2254	113,832	0,000063	53,602	25,296
MDEA - PZ [HCl] = 0,7692 N									
$Q_{L, \text{in}}$	$Q_{L, \text{out}}$	$Q_{G, \text{out}}$	CO <sub>2</sub> feed gas		CO <sub>2</sub> sales gas		Fluks abs.	Efisiensi (%)	C <sub>g, out</sub> (%)
(mL/min)	(ml/min)	(ml/min)	m (gram)	vol (mL)	m (gram)	vol (mL)	(mol/m <sup>2</sup> .s)		
100	100	450	0,4858	245,34	0,1506	76,0826	0,000081	68,9889	16,907
200	200	450	0,4858	245,34	0,1456	73,5180	0,000082	70,0342	16,337
300	300	450	0,4858	245,34	0,1286	64,9694	0,000086	73,5186	14,438
400	400	450	0,4858	245,34	0,1100	55,5660	0,000091	77,3514	12,348
500	500	450	0,4858	245,34	0,1049	53,0014	0,000092	78,3968	11,778
MDEA - MSG [HCl] = 0,701 N									
$Q_{L, \text{in}}$	$Q_{L, \text{out}}$	$Q_{G, \text{out}}$	CO <sub>2</sub> feed gas		CO <sub>2</sub> sales gas		Fluks abs.	Efisiensi (%)	C <sub>g, out</sub> (%)
(mL/min)	(ml/min)	(ml/min)	m (gram)	vol (mL)	m (gram)	vol (mL)	(mol/m <sup>2</sup> .s)		
100	100	450	0,4858	245,34	0,0524	26,4882	0,000105	89,2035	5,886
200	200	450	0,4858	245,34	0,0401	20,2557	0,000108	91,7438	4,501
300	300	450	0,4858	245,34	0,0370	18,6976	0,000109	92,3789	4,155
400	400	450	0,4858	245,34	0,0262	13,2441	0,000111	94,6017	2,943
500	500	450	0,4858	245,34	0,0216	10,9069	0,000112	95,5544	2,42

#### B.4 Hasil perhitungan fluks dan efisiensi desorpsi untuk pelarut MDEA

Fluks desorpsi dan efisiensi desorpsi dihitung menggunakan persamaan yang digunakan oleh Fang, dkk. (2012) :

$$N_{CO_2} = \frac{(Q_R \times \alpha_R \times M_R - Q_L \times \alpha_L \times M_L)}{6 \times 10^4 \times A}$$

$$\eta = \frac{(Q_R \times \alpha_R \times M_R - Q_L \times \alpha_L \times M_L)}{Q_R \times \alpha_R \times M_R} \times 100\%$$

dimana  $N_{CO_2}$  adalah fluks desorpsi dalam (mol/m<sup>2</sup>s),  $\alpha_R$  dan  $\alpha_L$  adalah CO<sub>2</sub> loading pada pelarut masuk dan keluar desorber (mol CO<sub>2</sub>/mol pelarut),  $Q_R$  dan  $Q_L$  adalah laju alir pelarut masuk dan keluar desorber (mL/menit),  $M_R$  dan  $M_L$  adalah konsentrasi pelarut masuk dan keluar desorber (mol/L), dan  $A$  adalah luas kontak gas-liquid (m<sup>2</sup>).

data – data diketahui atau ditetapkan :

- $A = 1,39425 \text{ m}^2$
- $\alpha_R = 0,24 \text{ mol CO}_2/\text{mol pelarut}$
- $P_{\text{vakum}} = 0,2 \text{ bar (gauge)}$
- $T_{\text{operasi}} = 70^\circ \text{ C}$

**Tabel B.4** Hasil perhitungan fluks dan efisiensi desorpsi untuk pelarut MDEA

Pelarut	$Q_R$ (ml/min)	$Q_L$ (ml/min)	$\alpha_{in}$	$\alpha_{out}$	$M_R$	$M_L$	$N_{CO_2}$ (mol/m <sup>2</sup> s)	Efisiensi (%)
MDEA	100	80	0,2367	0,2308	2,5738	1,92130	0,00030	41,77
	200	175	0,2367	0,2238		2,00120	0,00052	35,68
	300	280	0,2367	0,2158		2,10240	0,00067	30,49
	400	390	0,2367	0,2091		2,18230	0,00079	26,99
	500	480	0,2367	0,2087		2,24130	0,000957	26,29
MDEA-PZ	100	80	0,2492	0,1641	2,3834	2,18478	0,00037	51,72
	200	180	0,2492	0,1607		2,24320	0,00064	45,38
	300	274	0,2492	0,1644		2,26657	0,00091	42,71
	400	390	0,2492	0,1662		2,27825	0,00108	37,85
	500	490	0,2492	0,1657		2,31330	0,001305	36,76
MDEA-MSG	100	90	0,2363	0,1969	2,0095	1,91935	0,00016	28,37
	200	190	0,2363	0,1996		1,94717	0,00025	22,24
	300	275	0,2363	0,2002		1,97498	0,00040	23,68
	400	380	0,2363	0,2034		2,00280	0,00042	18,49
	500	490	0,2363	0,1933		2,11407	0,00044	15,64



### B.5 Data hasil analisa titrasi chittic sales gas untuk pelarut DEA

Data percobaan diketahui : T lingkungan = 31 °C = 304,15 K

P lingkungan = 1 atm

BM CO<sub>2</sub> = 44,01 gram/gmol

ρ<sub>CO2</sub> = 1,98 g/L

M NaOH = 0,47 mol/L

M HCl = 0,8345 mol/L

Q<sub>CO2,in</sub> = 600 mL/menit dan C<sub>CO2, in</sub> = 40% vol

$$massa CO_2 = Volume HCl \times M_{HCl} \times BM_{CO_2}$$

**Tabel B.5** Hasil percobaan titrasi chittic untuk sampel sales gas menggunakan pelarut DEA

DEA											
Q <sub>L</sub> (ml/min)	Sample ke-	Indikator	Vol HCl			Vol rata- rata	Vol gas CO <sub>2</sub>		Vol rata- rata	Massa CO <sub>2</sub>	Vol CO <sub>2</sub> (mL)
			awal	akhir	Δvol HCl		awal	akhir			
100	1	PP	0	0,6	0,6	7,05			8,45	0,2589	130,768
	2	MO	0,6	7,6	7			8,40			
	1	PP	7,7	8,3	0,6						
	2	MO	8,3	15,4	7,1			8,50			
200	1	PP	38,8	39,3	0,5	6,55	1,10	4,80	10,75	0,2406	121,494
	2	MO	39,3	46	6,7		1,20	10,50			
	1	PP	46	46,6	0,6		0,80	4,40			
	2	MO	1	7,4	6,4		1,00	11,00			
300	1	PP	17,6	18,4	0,8	6,4	1,10	8,80	10,90	0,2350	118,711
	2	MO	18,4	25	6,6		1,20	6,20			
	1	PP	25	25,5	0,5		1,80	3,20			
	2	MO	25,5	31,7	6,2		1,00	15,60			
400	1	PP	8,7	9,3	0,6	6,05	1,80	5,20	11,50	0,2222	112,219
	2	MO	9,3	15,6	6,3		1,50	11,60			
	1	PP	15,6	16,2	0,6		1,40	6,40			
	2	MO	16,2	22	5,8		1,50	11,40			
500	1	PP	22	22,7	0,7	6	1,60	6,00	12,20	0,2204	111,292
	2	MO	22,7	28,6	5,9		1,40	12,00			
	1	PP	28,6	29,4	0,8		1,60	6,20			
	2	MO	29,4	35,5	6,1		1,20	12,40			

(lanjutan) **Tabel B.5** Hasil percobaan titrasi chittic untuk sampel *sales gas* menggunakan pelarut DEA

DEA - PZ											
Q <sub>L</sub> (ml/min)	Sample ke-	Indikator	Vol HCl			Vol rata- rata	Vol gas CO <sub>2</sub>		Vol rata- rata	Massa CO <sub>2</sub>	Vol CO <sub>2</sub> (mL)
			awal	akhir	Δvol HCl		awal	akhir			
100	1	PP	0	0,1	0,1	1,75	2,00	4,00	12,50	0,0643	32,4602
	2	MO	0,1	2	1,9		2,00	13,00			
	1	PP	2	2,2	0,2		2,00	3,80			
	2	MO	2,2	3,8	1,6		2,00	12,00			
200	1	PP	14,3	15,8	1,5	1,45	1,00	8,20	12,70	0,0533	26,8956
	2	MO	17,5	18,9	1,4		1,20	12,80			
	1	PP	15,8	16,8	1		1,00	8,20			
	2	MO	18,9	20,4	1,5		1,40	12,60			
300	1	PP	0	0,5	0,5	1,15	0,90	3,20	12,90	0,0422	21,331
	2	MO	1,1	2,2	1,1		1,00	13,20			
	1	PP	0,5	1,1	0,6		0,80	2,40			
	2	MO	2,2	3,4	1,2		0,80	12,60			
400	1	PP	5,2	5,8	0,6	0,95	1,00	6,40	13,30	0,0349	17,6212
	2	MO	6,5	7,5	1		0,40	13,00			
	1	PP	5,8	6,5	0,7		0,80	5,60			
	2	MO	7,5	8,4	0,9		0,80	13,60			
500	1	PP	8,4	9,2	0,8	0,85	1,00	6,00	13,50	0,0312	15,7664
	2	MO	9,2	10,2	1		0,60	13,40			
	1	PP	10,2	11	0,8		0,80	5,80			
	2	MO	11	11,7	0,7		0,80	13,60			
DEA - Arginin											
Q <sub>L</sub> (ml/min)	Sample ke-	Indikator	Vol HCl			Vol rata- rata	Vol gas CO <sub>2</sub>		Vol rata- rata	Massa CO <sub>2</sub>	Vol CO <sub>2</sub>
			awal	akhir	Δvol HCl		awal	akhir			
100	1	PP	2,4	2,7	0,3	3,75	0,60	12,20	11,0	0,0990	50,0114
	2	MO	2,7	6,5	3,8		0,80	14,00			
	1	PP	6,5	6,7	0,2		0,60	12,00			
	2	MO	6,7	10,4	3,7		1,00	8,00			
200	1	PP	9,4	10,3	0,9	3,65	1,60	2,60	12,5	0,0964	48,6777
	2	MO	10,3	14	3,7		2,00	12,60			
	1	PP	14	15	1		1,2	2,8			
	2	MO	15	18,6	3,6		2	12,3			

(lanjutan) **Tabel B.5** Hasil percobaan titrasi chittic untuk sampel *sales gas* menggunakan pelarut DEA

DEA - Arginin											
Q <sub>L</sub> (ml/min)	Sample ke-	Indikator	Vol HCl			Vol rata- rata	Vol gas CO <sub>2</sub>		Vol rata- rata	Massa CO <sub>2</sub>	Vol CO <sub>2</sub>
			awal	akhir	Δvol HCl		awal	akhir			
300	1	PP	11,7	12,7	1	3,3	2,00	2,60	12,6	0,0871	44,01
	2	MO	12,7	16,1	3,4		1,80	12,40			
	1	PP	16,1	17	0,9		1,60	2,60			
	2	MO	17	20,2	3,2		1,40	12,70			
400	1	PP	20,2	21	0,8	2,9	1,80	2,60	12,7	0,0766	38,6755
	2	MO	21	24	3		1,80	12,80			
	1	PP	24	25,2	1,2		1,80	2,60			
	2	MO	25,2	28	2,8		1,50	12,60			
500	1	PP	29	29,9	0,9	2,55	2,00	2,80	12,9	0,0673	34,0077
	2	MO	29,9	32,1	2,2		2,20	12,80			
	1	PP	32,1	33,2	1,1		1,80	2,60			
	2	MO	33,2	36,1	2,9		2,00	13,00			
DEA - MSG											
Q <sub>L</sub> (ml/min)	Sample ke-	Indikator	Vol HCl			Vol rata- rata	Vol gas CO <sub>2</sub>		Vol rata- rata	Massa CO <sub>2</sub> (g)	Vol CO <sub>2</sub> (mL)
			awal	akhir	Δvol HCl		awal	akhir			
100	1	PP	15,3	15,5	0,2	2,25	1,00	3,40	8,00	0,059	30,0068
	2	MO	15,5	18	2,5		1,20	8,20			
	1	PP	17,7	17,9	0,2		1,20	4,00			
	2	MO	17,9	19,9	2		1,20	7,80			
200	1	PP	32	33,1	1,1	2	2,20	3,40	8,35	0,053	26,6727
	2	MO	33,1	35	1,9		2,00	8,20			
	1	PP	35	35,8	0,8		2,00	3,00			
	2	MO	35,8	37,9	2,1		1,80	8,50			
300	1	PP	39	39,9	0,9	1,95	2,00	3,20	2,75	0,051	26,0059
	2	MO	39,9	42	2,1		2,00	2,40			
	1	PP	42	43	1		1,80	2,80			
	2	MO	43	44,8	1,8		1,80	3,10			
400	1	PP	4	5,1	1,1	1,6	1,40	2,40	2,40	0,042	21,3382
	2	MO	5,1	7	1,9		1,90	2,20			
	1	PP	7	7,9	0,9		1,60	2,80			
	2	MO	7,9	9,2	1,3		1,80	2,60			
500	1	PP	9,2	10,2	1	1,55	1,20	2,60	2,10	0,041	20,6714
	2	MO	10,2	11,7	1,5		2,00	2,00			
	1	PP	11,7	12,5	0,8		1,60	2,60			
	2	MO	12,5	14,1	1,6		1,80	2,20			

### B.6 Data hasil analisa titrasi chittic *rich solvent* absorpsi untuk pelarut DEA

Data percobaan diketahui : T lingkungan = 31 °C = 304,15 K

P lingkungan = 1 atm

Volume sampel = 2 mL

Perhitungan untuk CO<sub>2</sub> loading ( α ) adalah sebagai berikut :

$$\alpha = \frac{\text{mol}(\text{CO}_2)}{\text{mol}(\text{pelarut})} = \left[ \frac{(V_{\text{gas}})(P)(273K)}{(101325 \text{ Pa})(T)(22,4 \text{ L/mol})} \right] \frac{1}{C_{\text{pelarut}} V_{\text{sampel}}}$$

**Tabel B.6** Hasil percobaan titrasi chittic untuk sampel *rich solvent* absorpsi menggunakan pelarut DEA

DEA					Konsentrasi = 2,993 mol/L					
Q <sub>L</sub> (ml/min)	Sample ke-	Vol HCl (mL)			Vol rata-rata	Vol CO <sub>2</sub> (mL)			Vol rata-rata	α rich absorpsi
		awal	akhir	Δvol		awal	akhir	Δvol		
100	1	0	4,9	4,9	4,85	1,4	34,50	34,50	34,40	0,1986
	2	5	9,8	4,8		1	34,30	34,30		
200	1	25,7	32,2	6,5	6,55	1	8,00	8,00	8,00	0,0097
	2	32,2	38,8	6,6		1	8,00	8,00		
300	1	3	10,5	7,5	7,30	1,2	9,20	9,20	8,80	0,0101
	2	10,5	17,6	7,1		1,2	8,40	8,40		
400	1	20,2	27,3	7,1	8,20	1,2	9,00	9,00	9,85	0,0111
	2	27,3	36,6	9,3		1,2	10,70	10,70		
500	1	36,6	45	8,4	8,60	1,2	10,00	11,00	11,10	0,0168
	2	0	9	8,8		1,4	10,20	11,20		
DEA - PZ					Konsentrasi = 2,93 mol/L					
Q <sub>L</sub> (ml/min)	Sample ke-	Vol HCl (mL)			Vol rata-rata	Vol CO <sub>2</sub> (mL)			Vol rata-rata	α rich absorpsi
		awal	akhir	Δvol		awal	akhir	Δvol		
100	1	9,1	10,3	1,2	1,4	1,4	43,10	43,10	43,15	0,2864
	2	10,3	11,9	1,6		1,4	43,20	43,20		
200	1	0	7,3	7,3	7,15	1,2	9,80	9,80	10,00	0,0196
	2	7,3	14,3	7		0,8	10,20	10,20		
300	1	27,4	34,5	7,1	7,2	1,4	10,60	10,60	10,80	0,0247
	2	34,5	41,8	7,3		1	11,00	11,00		
400	1	32,1	39,8	7,7	7,6	1,4	13,40	13,40	13,30	0,0391
	2	35	42,5	7,5		1,4	13,20	13,20		
500	1	9	17	8	8,15	1,4	14,00	14,00	14,10	0,0408
	2	20	28,3	8,3		1,2	14,20	14,20		

(lanjutan) **Tabel B.6** Hasil percobaan titrasi chittic untuk sampel *rich solvent* absorpsi menggunakan pelarut DEA

DEA - Arginin					Konsentrasi = 2,88				mol/L	
Q <sub>L</sub> (ml/min)	Sample ke-	Vol HCl (mL)			Vol rata-rata	Vol CO <sub>2</sub> (mL)			Vol rata-rata	α rich absorpsi
		awal	akhir	Δvol		awal	akhir	Δvol		
100	1	0	6	6	5,8	0,2	43,40	43,40	43,70	0,2627
	2	6	11,6	5,6		1	44,00	44,00		
200	1	12,5	19,4	6,9	6,75	1,8	8,20	8,20	8,40	0,0114
	2	19,4	26	6,6		1,8	8,60	8,60		
300	1	34,1	41,1	7	7,05	1,6	9,20	9,20	9,30	0,0156
	2	41,1	48,2	7,1		1,6	9,40	9,40		
400	1	14,2	21,3	7,1	7,15	2	9,60	9,60	9,50	0,0163
	2	21,3	28,5	7,2		2	9,40	9,40		
500	1	28,5	36	7,5	7,45	1,8	10,00	10,00	9,90	0,017
	2	40	47,4	7,4		2	9,80	9,80		
DEA - MSG					Konsentrasi = 2,90				mol/L	
Q <sub>L</sub> (ml/min)	Sample ke-	Vol HCl (mL)			Vol rata-rata	Vol CO <sub>2</sub> (mL)			Vol rata-rata	α rich absorpsi
		awal	akhir	Δvol		awal	akhir	Δvol		
100	1	0	3,8	3,8	3,6	1,6	43,60	43,60	43,75	0,2783
	2	3,8	7,2	3,4		1,4	43,90	43,90		
200	1	2,8	10	7,2	7	1,6	9,60	9,60	9,80	0,0194
	2	10	16,8	6,8		2,5	10,00	10,00		
300	1	17,7	24,9	7,2	7,15	2,3	10,70	10,70	10,55	0,0236
	2	24,9	32	7,1		2,6	10,60	10,40		
400	1	2,9	10,2	7,3	7,4	3,2	10,80	10,80	11,00	0,0250
	2	10,2	17,7	7,5		3	11,20	11,20		
500	1	25	32,3	7,3	7,5	2,8	11,00	11,00	11,20	0,0256
	2	32,3	40	7,7		2,8	11,00	11,40		

### B.7 Data hasil analisa titrasi chittic sales gas untuk pelarut MDEA

Data percobaan diketahui : T lingkungan = 31 °C = 304,15 K

P lingkungan = 1 atm

BM CO<sub>2</sub> = 44,01 gram/gmol

ρ<sub>CO<sub>2</sub></sub> = 1,98 g/L

Q<sub>CO<sub>2</sub>,in</sub> = 600 mL/menit dan C<sub>CO<sub>2</sub>,in</sub> = 40% vol

$$massa\ CO_2 = Volume\ HCl \times M_{HCl} \times BM_{CO_2}$$

**Tabel B.7** Hasil percobaan titrasi chittic untuk sampel *sales gas* menggunakan pelarut MDEA

MDEA			M NaOH = 0,9525 mol/L				M HCl = 0,8065 mol/L				
Q <sub>L</sub> (ml/min)	Sample ke-	Indikator	Vol HCl			Vol rata-rata	Vol gas CO <sub>2</sub>		Vol rata-rata	Massa CO <sub>2</sub>	Vol CO <sub>2</sub> (mL)
			awal	akhir	Δvol HCl		awal	akhir			
100	1	PP	39,2	42,5	3,3	7,4	1,40	15,40	15,35	0,2627	132,655
	2	MO	42,5	50	7,5		1,60	15,20			
	1	PP	5	8,3	3,3		1,20	15,60			
	2	MO	8,3	15,6	7,3		1,80	15,50			
200	1	PP	1	4,6	3,6	7,2	1,80	15,00	15,00	0,2556	129,069
	2	MO	4,6	12	7,4		1,80	14,80			
	1	PP	19,8	23,5	3,7		1,40	15,40			
	2	MO	23,5	30,5	7		2,00	15,20			
300	1	PP	23,7	27,4	3,7	7,15	1,20	15,20	14,70	0,2538	128,173
	2	MO	31,4	38,6	7,2		1,20	14,80			
	1	PP	27,4	31,4	4		1,40	15,40			
	2	MO	34,9	42	7,1		1,40	14,60			
400	1	PP	26	28,3	2,3	7	1,00	5,20	13,50	0,2485	125,484
	2	MO	28,3	35,2	6,9		2,20	14,00			
	1	PP	2,7	4,8	2,1		1,80	5,00			
	2	MO	4,8	11,9	7,1		2,00	13,00			
500	1	PP	17,1	19,1	2	6,35	1,60	7,00	12,70	0,2254	113,832
	2	MO	19,1	25,6	6,5		2,20	12,40			
	1	PP	14	16	2		1,40	6,20			
	2	MO	16	22,2	6,2		1,80	13,00			
MDEA-PZ			M NaOH = 0,9525 mol/L				M HCl = 0,7692 mol/L				
Q <sub>L</sub> (ml/min)	Sample ke-	Indikator	Vol HCl			Vol rata-rata	Vol gas CO <sub>2</sub>		Vol rata-rata	Massa CO <sub>2</sub>	Vol CO <sub>2</sub> (mL)
			awal	akhir	Δvol HCl		awal	akhir			
100	1	PP	23,1	24,9	1,8	4,45	1,4	5,4	25,60	0,1506	76,0826
	2	MO	24,9	29,3	4,4		2	25,4			
	1	PP	29,3	31	1,7		2	6			
	2	MO	31	35,5	4,5		1,8	25,8			
200	1	PP	27,6	29,4	1,8	4,3	1,60	4,00	17,90	0,1456	73,518
	2	MO	29,4	33,6	4,2		1,60	17,80			
	1	PP	33,6	35,5	1,9		2	4,8			
	2	MO	35,5	39,9	4,4		2,2	18			

(lanjutan) **Tabel B.7** Hasil percobaan titrasi chittic untuk sampel *sales gas* menggunakan pelarut MDEA

MDEA-PZ			M NaOH = 0,9525 mol/L				M HCl = 0,7692 mol/L				
Q <sub>L</sub> (ml/min)	Sample ke-	Indikator	Vol HCl			Vol rata-rata	Vol gas CO <sub>2</sub>		Vol rata-rata	Massa CO <sub>2</sub>	Vol CO <sub>2</sub> (mL)
			awal	akhir	Δvol HCl		awal	akhir			
300	1	PP	16,2	18,4	2,2	3,8	1,40	3,20	16,90	0,1286	64,9694
	2	MO	18,4	22,2	3,8		1,40	16,80			
	1	PP	22,2	24	1,8		1,8	3,8			
	2	MO	24	27,8	3,8		1,8	17			
400	1	PP			0	3,25			15,60	0,1100	55,566
	2	MO	19,7	23	3,3		1,80	15,40			
	1	PP			0						
	2	MO	23	26,2	3,2		1,8	15,80			
500	1	PP			0	3,1			15,20	0,1049	53,0014
	2	MO	7	10,2	3,2		1,80	15,40			
	1	PP			0						
	2	MO	10,2	13,2	3		1,80	15,00			
MDEA-MSG			M NaOH = 0,8750 mol/L				M HCl = 0,7010 mol/L				
Q <sub>L</sub> (ml/min)	Sample ke-	Indikator	Vol HCl			Vol rata-rata	Vol gas CO <sub>2</sub>		Vol rata-rata	Massa CO <sub>2</sub>	Vol CO <sub>2</sub>
			awal	akhir	Δvol HCl		awal	akhir			
100	1	PP	3,1	6,3	3,2	1,7	1,80	6,80	5,1	0,0524	26,4882
	2	MO	6,3	7,9	1,6		1,80	5,00			
	1	PP	7,9	11	3,1		1,60	4,80			
	2	MO	11	12,8	1,8		1,80	5,20			
200	1	PP	18,6	22,2	3,6	1,3	1,80	5,60	4,1	0,0401	20,2557
	2	MO	22,2	23,4	1,2		2,40	4,00			
	1	PP	23,7	27,4	3,7		2	5,4			
	2	MO	27,4	28,8	1,4		2,2	4,2			
300	1	PP	34,2	37,8	3,6	1,2	1,60	5,60	3,3	0,0370	18,6976
	2	MO	37,8	39	1,2		2,00	3,40			
	1	PP	39	42,5	3,5		2,00	5,80			
	2	MO	42,5	43,7	1,2		1,80	3,20			
400	1	PP	0	3,5	3,5	0,85	2,20	6,00	2,9	0,0262	13,2441
	2	MO	3,5	4,3	0,8		2,00	3,00			
	1	PP	4,3	7,7	3,4		1,80	6,00			
	2	MO	7,7	8,6	0,9		2,00	2,80			
500	1	PP	8,7	12,2	3,5	0,7	2,00	8,20	2,7	0,0216	10,9069
	2	MO	12,2	12,9	0,7		2,20	2,60			
	1	PP	13	16,7	3,7		2,00	8,00			
	2	MO	16,7	17,4	0,7		2,00	2,80			

### B.8 Data hasil analisa titrasi chittic *rich solvent* absorpsi untuk pelarut MDEA

Data percobaan diketahui :  $T_{\text{lingkungan}} = 31^{\circ}\text{C} = 304,15\text{ K}$

$$P_{\text{lingkungan}} = 1 \text{ atm}$$

Volume sampel = 3 mL

Perhitungan untuk  $\text{CO}_2$  loading ( $\alpha$ ) adalah sebagai berikut :

$$\alpha = \frac{mol(CO_2)}{mol(pelarut)} = \frac{\frac{(V_{gas})(P)(273K)}{(101325 Pa)(T)(22,4L/mol)}}{C_{pelarut} V_{sampel}}$$

Hasil perhitungan untuk berbagai jenis pelarut MDEA dan MDEA + aktivator disajikan dalam **Tabel B.8** berikut :

**Tabel B.8** Hasil percobaan titrasi chittic untuk sampel rich solvent absorpsi menggunakan pelarut MDEA

MDEA					Konsentrasi = 2,5 mol/L						
Q <sub>L</sub> (ml/min)	Sample ke-	Vol HCl (mL)			Vol rata-rata	Vol CO <sub>2</sub> (mL)			Vol rata-rata	M <sub>R</sub>	α rich absorpsi
		awal	akhir	Δvol		awal	akhir	Δvol			
100	1	15,3	20,9	5,6	5,45	2	12,80	12,80	12,45	1,4651	0,06406
	2	20,7	26	5,3		2	12,10	12,10			
200	1	39,2	45	5,8	5,60	2,2	13,40	13,40	13,20	1,5055	0,06769
	2	3,1	8,5	5,4		2	13,00	13,00			
300	1	12	18,2	6,2	6,25	1,8	15,00	15,00	14,80	1,6802	0,06823
	2	18,2	24,5	6,3		2	14,60	14,60			
400	1	5,8	12,7	6,9	6,75	1,4	15,80	15,80	16,00	1,8146	0,06835
	2	12,9	19,5	6,6		2,2	16,20	16,20			
500	1	20,2	27,5	7,3	7,35	1,2	17,40	17,40	17,60	1,9759	0,06955
	2	27,5	34,9	7,4		1,8	17,80	17,80			
MDEA - PZ					Konsentrasi = 2,50 mol/L						
Q <sub>L</sub> (ml/min)	Sample ke-	Vol HCl (mL)			Vol rata-rata	Vol CO <sub>2</sub> (mL)			Vol rata-rata	M <sub>R</sub>	α rich absorpsi
		awal	akhir	Δvol		awal	akhir	Δvol			
100	1	0	8,1	8,1	8,25	1	13,40	13,40	13,80	2,2179	0,03355
	2	8,1	16,5	8,4		1,2	14,20	14,20			
200	1	29,7	37,9	8,2	8,3	1,4	12,60	12,60	12,70	2,2313	0,02644
	2	37,9	46,3	8,4		1,7	12,80	12,80			
300	1	5,5	13,9	8,4	8,5	1,8	13,00	13,00	13,20	2,2851	0,02758
	2	13,9	22,5	8,6		1,8	13,40	13,40			



(lanjutan) **Tabel B.8** Hasil percobaan titrasi chittic untuk sampel rich solvent absorpsi menggunakan pelarut MDEA

400	1	9,2	17,2	8	7,95	1,4	10,60	10,60	10,70	2,1372	0,01725
	2	1,3	9,2	7,9		1,2	10,80	10,80			
500	1	17,2	25,3	8,1	8,2	1,8	11,60	12,60	12,60	2,2044	0,0276
	2	25,3	33,6	8,3		1,6	12,60	12,60			
MDEA - MSG											

### B.9 Data hasil analisa titrasi chittic *rich solvent* desorpsi untuk pelarut DEA

Data percobaan yang diketahui :

$$T_{\text{pelarut}} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C} = 342,15 \text{ K}$$

$$T_{\text{lingkungan}} = 31 \text{ }^{\circ}\text{C} = 304,15 \text{ K}$$

$$P_{\text{vakum}} = 0,20 \text{ (gauge)}$$

$$P_{\text{lingkungan}} = 1 \text{ atm}$$

$$\text{Vol sample} = 2 \text{ mL}$$

Perhitungan untuk CO<sub>2</sub> loading ( α ) adalah sebagai berikut :

$$\alpha = \frac{\text{mol}(\text{CO}_2)}{\text{mol}(\text{pelarut})} = \left[ \frac{(V_{\text{gas}})(P)(273 \text{ K})}{(101325 \text{ Pa})(T)(22,4 \text{ L/mol})} \right] \frac{1}{C_{\text{pelarut}} V_{\text{sampel}}}$$

Hasil perhitungan untuk berbagai jenis pelarut DEA dan DEA + aktivator disajikan dalam **Tabel B.9** berikut :

**Tabel B.9** Hasil percobaan titrasi chittic *rich solvent* desorpsi untuk pelarut DEA

DEA				Konsentrasi = 2,933			mol/L	
Flowrate (ml/min)	$\alpha$ rich	Vol HCl			Vol CO2	Vol CO2- Vol HCl	$\alpha$ lean sample	$\alpha$ lean desorpsi
		awal	akhir	$\Delta$ vol HCl				
100	0,24013	11,4	17	5,6	31,6	26	0,178290	0,178633
		17	23	6	32,1	26,1	0,178976	
200	0,24013	23	28,8	5,8	33,4	27,6	0,189262	0,186519
		28,8	35,1	6,3	33,1	26,8	0,183776	
300	0,25095	12,2	17,8	5,6	33,1	27,5	0,188576	0,196119
		17,8	23,9	6,1	35,8	29,7	0,203662	
400	0,2434	24,7	30,3	5,6	34,5	28,9	0,198176	0,198176
		30,3	36,1	5,8	34,7	28,9	0,198176	
500	0,24205	35,4	42	6,6	35	28,4	0,194748	0,200233
		5,3	11,8	6,5	36,5	30	0,205719	
DEA – PZ				Konsentrasi = 2,9318			mol/L	
Flowrate (ml/min)	$\alpha$ rich	Vol HCl			Vol CO2	Vol CO2- Vol HCl	$\alpha$ lean sample	$\alpha$ lean desorpsi
		awal	akhir	$\Delta$ vol HCl				
100	0,24068	44,2	47,3	3,1	26	22,9	0,157097	0,16121
		2	5	3	27,1	24,1	0,165329	
200	0,24068	16,5	19,8	3,3	28,2	24,9	0,170817	0,17013
		19,8	23,5	3,7	28,4	24,7	0,169445	
300	0,24068	23,5	27	3,5	29,8	26,3	0,180421	0,18419
		27	30,8	3,8	31,2	27,4	0,187967	
400	0,24173	30,8	34,7	3,9	32	28,1	0,192769	0,19551
		34,8	38,5	3,7	32,6	28,9	0,198257	
500	0,24173	30,3	34,2	3,9	33,2	29,3	0,201001	0,19826
		33,9	38	4,1	32,6	28,5	0,195513	
DEA - Arginin				Konsentrasi = 2,8762			mol/L	
Flowrate (ml/min)	$\alpha$ rich	Vol HCl			Vol CO2	Vol CO2- Vol HCl	$\alpha$ lean sample	$\alpha$ lean desorpsi
		awal	akhir	$\Delta$ vol HCl				
100	0,2411	2,5	7,6	5,1	25,4	20,3	0,141952	0,139504892
		7,6	12,6	5	24,6	19,6	0,137057	
200	0,2411	10	15,2	5,2	25,9	20,7	0,144749	0,149993981
		15,2	20	4,8	27	22,2	0,155239	
300	0,2411	22,5	28	5,5	27,6	22,1	0,154539	0,153490345
		35	40,2	5,2	27	21,8	0,152441	
400	0,2411	25	30,1	5,1	29	23,9	0,167126	0,162580889
		30,1	35,7	5,6	28,2	22,6	0,158036	
500	0,2411	0	6	6	30	24	0,167825	0,16432907
		6	12	6	29	23	0,160833	

(lanjutan) **Tabel B.9** Hasil percobaan titrasi chittic *rich solvent* desorpsi untuk pelarut DEA

DEA - MSG			Konsentrasi = 2,902 mol/L					
Flowrate (ml/min)	$\alpha$ rich	Vol HCl			Vol CO <sub>2</sub>	Vol CO <sub>2</sub> - Vol HCl	$\alpha$ lean sample	$\alpha$ lean desorpsi
		awal	akhir	$\Delta$ vol HCl				
100	0,2423	0	6,2	6,2	25,6	19,4	0,135659	0,133211438
		6,2	12,3	6,1	24,8	18,7	0,130764	
200	0,2423	3,1	9,1	6	27	21	0,146847	0,149644345
		9,1	15,5	6,4	28,2	21,8	0,152441	
300	0,2423	23,2	29,3	6,1	27,8	21,7	0,151742	0,15104289
		29,3	35,8	6,5	28	21,5	0,150344	
400	0,2423	5,7	12,3	6,6	28,4	21,8	0,152441	0,153140708
		12,3	18,5	6,2	28,2	22	0,15384	
500	0,2423	25,4	32	6,6	30,6	24	0,167825	0,163280161
		32	39	7	29,7	22,7	0,158735	

**B.10 Data hasil analisa titrasi chittic *rich solvent* desorpsi untuk pelarut MDEA**

Data percobaan yang diketahui :

$$T_{\text{pelarut}} = 70\text{ }^{\circ}\text{C} = 342,15\text{ K}$$

$$T_{\text{lingkungan}} = 31\text{ }^{\circ}\text{C} = 304,15\text{ K}$$

$$P_{\text{vakum}} = 0,20\text{ (gauge)}$$

$$P_{\text{lingkungan}} = 1\text{ atm}$$

$$\text{Vol sample} = 3\text{ mL}$$

Perhitungan untuk CO<sub>2</sub> loading ( $\alpha$ ) adalah sebagai berikut :

$$\alpha = \frac{\text{mol}(\text{CO}_2)}{\text{mol}(\text{pelarut})} = \left[ \frac{(V_{\text{gas}})(P)(273\text{ K})}{(101325\text{ Pa})(T)(22,4\text{ L/mol})} \right] \frac{1}{C_{\text{pelarut}} V_{\text{sampel}}}$$

Hasil perhitungan untuk berbagai jenis pelarut MDEA dan MDEA + aktivator disajikan dalam **Tabel B.10** berikut :

**Tabel B.10** Hasil percobaan titrasi chittic *rich solvent* desorpsi untuk pelarut MDEA

MDEA		M <sub>R</sub> = 2,5738 mol/L			M NaOH 0,9525 mol/L			M HCl : 0,7692 mol/L		
Q <sub>L,in</sub> (mL/min)	$\alpha$ rich	Vol HCl			Vol HCl	Vol CO <sub>2</sub>	Vol CO <sub>2</sub>	V <sub>CO<sub>2</sub>- V<sub>HCl</sub></sub>	M <sub>L</sub>	$\alpha$ lean
		awal	akhir	$\Delta$ vol HCl						
100	0,237	0,5	7,3	6,8	6,85	37	37,1	30,25	1,7563	0,23081
		7,3	14,2	6,9		37,2				

(lanjutan) **Tabel B.10** Hasil percobaan titrasi chittic *rich solvent* desorpsi untuk pelarut MDEA

MDEA		M <sub>R</sub> = 2,5738 mol/L			M NaOH 0,9525 mol/L			M HCl : 0,7692 mol/L		
Q <sub>L,in</sub> (mL/min)	α rich	Vol HCl			Vol HCl	Vol CO <sub>2</sub>	Vol CO <sub>2</sub>	V <sub>CO<sub>2</sub></sub> - V <sub>HCl</sub>	M <sub>L</sub>	α lean
		awal	akhir	Δvol HCl						
200	0,237	14,3	21,5	7,2	7,1	37,6	37,5	30,4	1,8204	0,22379
		28,2	35,2	7		37,4				
300	0,237	16,8	24,2	7,4	7,35	37,8	37,7	30,35	1,8845	0,21582
		23,8	31,1	7,3		37,6				
400	0,237	0	7,6	7,6	7,6	38	38	30,4	1,9486	0,20906
		30,8	38,4	7,6		38				
500	0,237	21,3	29	7,7	7,75	38,6	38,7	30,95	1,9871	0,20873
		29	36,8	7,8		38,8				
MDEA-PZ		M <sub>R</sub> = 2,3834 mol/L			M NaOH : 0,8750 mol/L			M HCl : 0,7010 mol/L		
Q <sub>L,in</sub> (mL/min)	α rich	Vol HCl			Vol HCl	Vol CO <sub>2</sub>	Vol CO <sub>2</sub>	V <sub>CO<sub>2</sub></sub> - V <sub>HCl</sub>	M <sub>L</sub>	α lean
		awal	akhir	Δvol HCl						
100	0,2492	0,6	10	9,4	9,35	36,2	36,1	26,75	2,1848	0,16408
		10,1	19,4	9,3		36				
200	0,2492	10,2	19,8	9,6	9,6	36,4	36,5	26,9	2,2432	0,16070
		19,8	29,4	9,6		36,6				
300	0,2492	29,4	39	9,6	9,7	37,6	37,5	27,8	2,2666	0,16437
		13	22,8	9,8		37,4				
400	0,2492	1,8	11,6	9,8	9,75	38	38	28,25	2,2783	0,16617
		0,5	10,2	9,7		38				
500	0,2492	0,5	10,5	10	9,9	38,8	38,5	28,6	2,3133	0,16568
		11,1	20,9	9,8		38,2				
MDEA-MSG		M <sub>R</sub> = 2,0095 mol/L			M NaOH : 0,8750 mol/L			M HCl : 0,8345 mol/L		
Q <sub>L,in</sub> (mL/min)	α rich	Vol HCl			Vol HCl	Vol CO <sub>2</sub>	Vol CO <sub>2</sub>	V <sub>CO<sub>2</sub></sub> - V <sub>HCl</sub>	M <sub>L</sub>	α lean
		awal	akhir	Δvol HCl						
100	0,23627	0,3	7,2	6,9	6,9	35	35,1	28,2	1,9194	0,19689
		14,3	21,2	6,9		35,2				
200	0,23627	21,2	28,2	7	7	36	36	29	1,9472	0,19959
		28,5	35,5	7		36				
300	0,23627	25,1	32,2	7,1	7,1	36,8	36,6	29,5	1,9750	0,20017
		32,2	39,3	7,1		36,4				
400	0,23627	8,5	15,7	7,2	7,2	37,4	37,6	30,4	2,0028	0,20341
		15,7	22,9	7,2		37,8				
500	0,23627	23	30,5	7,5	7,6	38	38,1	30,5	2,1141	0,19334
		30,5	38,2	7,7		38,2				

## B.11 Hasil Perhitungan Wilson Plot untuk Pelarut DEA

**Tabel B.11** Hasil perhitungan Wilson Plot untuk pelarut DEA

konsentrasi rich pelarut = 2,933 mol/L					DEA			
Flow rate	$M_{lean\ DEA}$	$\alpha_{in}$	$\alpha_{out}$	$C_{in}$	$C_{out}$	$C_{in}^*$	$C_{out}^*$	$\Delta C_{CO_2}$
100	2,4201	0,2401	0,1786	0,7043	0,4323	0	0	0,5573
200	2,5244	0,2401	0,1865	0,7043	0,4708	0	0	0,5798
300	2,4409	0,2510	0,1961	0,7360	0,4787	0	0	0,5982
400	2,3783	0,2434	0,1982	0,7139	0,4713	0	0	0,5842
500	2,7330	0,2421	0,2002	0,7099	0,5472	0	0	0,6251
konsentrasi rich pelarut = 2,827 mol/L					DEA - PZ			
Flow rate	$C_{lean\ DEA}$	$\alpha_{in}$	$\alpha_{out}$	$C_{in}$	$C_{out}$	$C_{in}^*$	$C_{out}^*$	$\Delta C_{CO_2}$
100	1,2726	0,2407	0,1612	0,6804	0,2052	0	0	0,3964
200	1,4604	0,2407	0,1701	0,6804	0,2485	0	0	0,4288
300	1,5230	0,2407	0,1842	0,6804	0,2805	0	0	0,4513
400	1,5856	0,2417	0,1955	0,6834	0,3100	0	0	0,4723
500	1,6690	0,2417	0,1983	0,6834	0,3309	0	0	0,4860
konsentrasi rich pelarut = 2,8762 mol/L					DEA-Arginin			
Flow rate	$C_{lean\ DEA}$	$\alpha_{in}$	$\alpha_{out}$	$C_{in}$	$C_{out}$	$C_{in}^*$	$C_{out}^*$	$\Delta C_{CO_2}$
100	2,1071	0,2411	0,1395	0,6935	0,2940	0	0	0,4655
200	2,0863	0,2411	0,1500	0,6935	0,3129	0	0	0,4782
300	2,2323	0,2411	0,1535	0,6935	0,3426	0	0	0,4976
400	2,2323	0,2411	0,1626	0,6935	0,3629	0	0	0,5105
500	2,5035	0,2411	0,1643	0,6935	0,4114	0	0	0,5402
konsentrasi rich pelarut = 2,902 mol/L					DEA - MSG			
Flow rate	$C_{lean\ DEA}$	$\alpha_{in}$	$\alpha_{out}$	$C_{in}$	$C_{out}$	$C_{in}^*$	$C_{out}^*$	$\Delta C_{CO_2}$
100	2,5661	0,2423	0,1332	0,7032	0,3418	0	0	0,5010
200	2,5870	0,2423	0,1496	0,7032	0,3871	0	0	0,5295
300	2,6287	0,2423	0,1510	0,7032	0,3970	0	0	0,5356
400	2,6704	0,2423	0,1531	0,7032	0,4089	0	0	0,5428
500	2,8373	0,2423	0,1633	0,7032	0,4633	0	0	0,5749

**Tabel B.12** Hasil perhitungan  $K_{OL}$ (ml/min) untuk pelarut DEA

Pelarut	Flow rate (ml/min)	Velocity (m/det)	Re	$\frac{1}{Re^{0,6}}$	$K_{OL}$	$\frac{1}{K_{OL}}$
DEA	100	3,5E-06	0,0376	13,804	0,00254	393,0489
	200	7,1E-06	0,0752	7,928	0,00428	233,8637
	300	1,1E-05	0,1128	5,732	0,00583	171,6328
	400	1,4E-05	0,1503	4,553	0,00757	132,0950
	500	1,8E-05	0,1879	3,809	0,00768	130,1415
DEA-PZ	100	3,5E-06	0,0307	16,224	0,00487	205,2932
	200	7,1E-06	0,0614	9,318	0,00801	124,8172
	300	1,1E-05	0,0921	6,737	0,01030	97,0522
	400	1,4E-05	0,1228	5,352	0,01220	81,9472
	500	1,8E-05	0,1536	4,477	0,01412	70,8156
DEA-Arginin	100	3,5E-06	0,0306	16,274	0,00348	287,7528
	200	7,1E-06	0,0612	9,347	0,00619	161,4287
	300	1,1E-05	0,0918	6,758	0,00807	123,8686
	400	1,4E-05	0,1224	5,369	0,01040	96,1880
	500	1,8E-05	0,1530	4,491	0,01056	94,7093
DEA-MSG	100	3,5E-06	0,0309	16,161	0,00279	358,853
	200	7,1E-06	0,0617	9,282	0,00486	205,829
	300	1,1E-05	0,0926	6,711	0,00671	149,117
	400	1,4E-05	0,1234	5,331	0,00832	120,235
	500	1,8E-05	0,1543	4,459	0,00879	113,816

**Tabel B.13** Nilai hambatan individu untuk pelarut DEA

Pelarut	$\frac{1}{Re^{0,6}}$	$\frac{1}{K_{OL}}$	intersep	$\frac{1}{k_L} = \frac{1}{K_{OL}} - intersep$	$\frac{1}{k_m}$	$\frac{1}{k_g} = intersep - \frac{1}{k_m}$
DEA	13,804	393,049	17,533	375,516	12,3496	5,1834
	7,928	233,864	17,533	216,331	12,3496	5,1834
	5,732	171,633	17,533	154,100	12,3496	5,1834
	4,553	132,095	17,533	114,562	12,3496	5,1834
	3,809	130,141	17,533	112,608	12,3496	5,1834
DEA-PZ	16,224	205,293	20,076	185,217	12,3496	7,7264
	9,318	124,817	20,076	104,741	12,3496	7,7264
	6,737	97,052	20,076	76,976	12,3496	7,7264
	5,352	81,947	20,076	61,871	12,3496	7,7264
	4,477	70,816	20,076	50,740	12,3496	7,7264

(lanjutan) **Tabel B.13** Nilai hambatan individu untuk pelarut DEA

DEA-Arginin	16,274	287,753	39,632	248,121	12,3496	27,2824
	9,347	161,429	39,632	121,797	12,3496	27,2824
	6,758	123,869	39,632	84,237	12,3496	27,2824
	5,369	96,188	39,632	56,556	12,3496	27,2824
	4,491	94,709	39,632	55,077	12,3496	27,2824
DEA-MSG	16,161	358,853	54,299	304,554	12,3496	41,9494
	9,282	205,829	54,299	151,530	12,3496	41,9494
	6,711	149,117	54,299	94,818	12,3496	41,9494
	5,331	120,235	54,299	65,936	12,3496	41,9494
	4,459	113,816	54,299	59,517	12,3496	41,9494

**B.12 Hasil Perhitungan Wilson Plot untuk Pelarut MDEA****Tabel B.14** Hasil perhitungan Wilson Plot untuk pelarut MDEA

konsentrasi rich pelarut = 2,5738 mol/L					MDEA			
Flow rate	$C_{\text{lean DEA}}$	$\alpha_{\text{in}}$	$\alpha_{\text{out}}$	$C_{\text{in}}$	$C_{\text{out}}$	$C_{\text{in}}^*$	$C_{\text{out}}^*$	$\Delta C_{\text{CO}_2}$
100	1,9213	0,2367	0,2308	0,6092	0,4435	0	0	0,5156
200	2,0012	0,2367	0,2238	0,6092	0,4478	0	0	0,5244
300	2,1024	0,2367	0,2158	0,6092	0,4537	0	0	0,5277
400	2,1823	0,2367	0,2091	0,6092	0,4562	0	0	0,5291
500	2,2413	0,2367	0,2087	0,6092	0,4678	0	0	0,5354
konsentrasi rich pelarut = 2,3834 mol/L					MDEA - PZ			
Flow rate	$C_{\text{lean DEA}}$	$\alpha_{\text{in}}$	$\alpha_{\text{out}}$	$C_{\text{in}}$	$C_{\text{out}}$	$C_{\text{in}}^*$	$C_{\text{out}}^*$	$\Delta C_{\text{CO}_2}$
100	2,1848	0,2492	0,1641	0,5940	0,3585	0	0	0,4663
200	2,2432	0,2492	0,1607	0,5940	0,3605	0	0	0,4675
300	2,2666	0,2492	0,1644	0,5940	0,3725	0	0	0,4747
400	2,2783	0,2492	0,1662	0,5940	0,3786	0	0	0,4782
500	2,3133	0,2492	0,1657	0,5940	0,3833	0	0	0,4809
konsentrasi rich pelarut = 2,0095 mol/L					MDEA-MSG			
Flow rate	$C_{\text{lean DEA}}$	$\alpha_{\text{in}}$	$\alpha_{\text{out}}$	$C_{\text{in}}$	$C_{\text{out}}$	$C_{\text{in}}^*$	$C_{\text{out}}^*$	$\Delta C_{\text{CO}_2}$
100	1,9194	0,23627	0,1969	0,4748	0,3779	0	0	0,4245
200	1,9472	0,23627	0,1996	0,4748	0,3886	0	0	0,4303
300	1,9750	0,23627	0,2002	0,4748	0,3953	0	0	0,4338
400	2,0028	0,23627	0,2034	0,4748	0,4074	0	0	0,4402
500	2,1141	0,23627	0,1933	0,4748	0,4087	0	0	0,4409

**Tabel B.15** Hasil perhitungan  $K_{OL}$  untuk pelarut MDEA

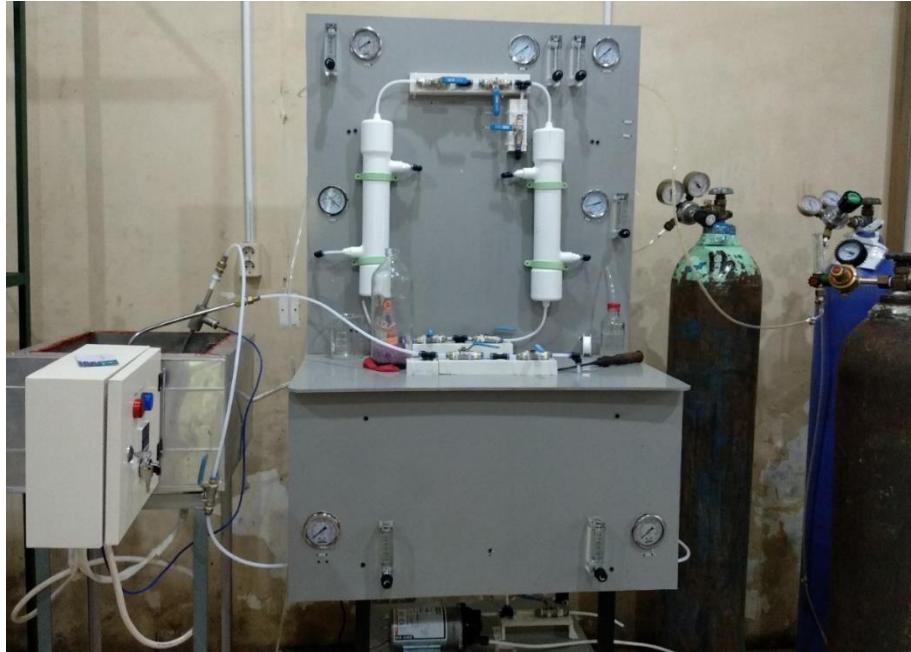
Pelarut	Flow rate (ml/min)	Velocity (m/det)	Re	$\frac{1}{Re^{0,8}}$	$K_{OL}$	$\frac{1}{K_{OL}}$
MDEA	100	1,2E-06	0,0377	13,7565	0,00059	1694,758
	200	2,4E-06	0,0755	7,9011	0,00099	1009,018
	300	3,6E-06	0,1132	5,7123	0,00126	792,115
	400	4,8E-06	0,1510	4,5380	0,00149	672,969
	500	6,0E-06	0,1887	3,7961	0,00179	559,385
MDEA-PZ	100	1,2E-06	0,0377	13,7565	0,00079	1270,049
	200	2,4E-06	0,0755	7,9011	0,00138	725,6077
	300	3,6E-06	0,1132	5,7123	0,00192	521,7453
	400	4,8E-06	0,1510	4,5380	0,00225	444,8124
	500	6,0E-06	0,1887	3,7961	0,00271	368,5213
MDEA-MSG	100	1,2E-06	0,0377	13,7565	0,00038	2636,881
	200	2,4E-06	0,0755	7,9011	0,00059	1704,363
	300	3,6E-06	0,1132	5,7123	0,00093	1076,251
	400	4,8E-06	0,1510	4,5380	0,00095	1048,956
	500	6,0E-06	0,1887	3,7961	0,00101	993,752

**Tabel B.16** Nilai hambatan individu untuk pelarut MDEA

Pelarut	$\frac{1}{Re^{0,6}}$	$\frac{1}{K_{OL}}$	intersep	$\frac{1}{k_L} = \frac{1}{K_{OL}} - intersep$	$\frac{1}{k_m}$	$\frac{1}{k_g} = intersep - \frac{1}{k_m}$
MDEA	13,757	1694,758	143,88	1550,878	12,3496	131,5304
	7,901	1009,018	143,88	865,138	12,3496	131,5304
	5,712	792,115	143,88	648,235	12,3496	131,5304
	4,538	672,969	143,88	529,089	12,3496	131,5304
	3,796	559,385	143,88	415,505	12,3496	131,5304
MDEA-PZ	13,757	1270,049	20,486	1249,563	12,3496	8,1364
	7,901	725,608	20,486	705,122	12,3496	8,1364
	5,712	521,745	20,486	501,259	12,3496	8,1364
	4,538	444,812	20,486	424,326	12,3496	8,1364
	3,796	368,521	20,486	348,035	12,3496	8,1364
MDEA-MSG	13,757	2636,881	254,8	2382,081	12,3496	242,4504
	7,901	1704,363	254,8	1449,563	12,3496	242,4504
	5,712	1076,251	254,8	821,451	12,3496	242,4504
	4,538	1048,956	254,8	794,156	12,3496	242,4504
	3,796	993,752	254,8	738,952	12,3496	242,4504



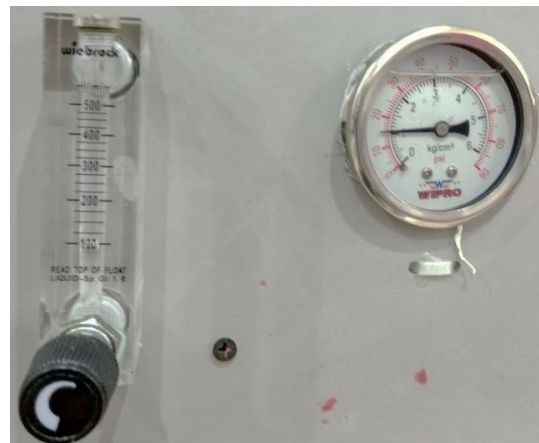
## LAMPIRAN C



**Gambar C.1.** Rangkaian alat percobaan absorpsi dan desorpsi menggunakan kontaktor membran *hollow fiber*



**Gambar C.2** Pressure gauge dan *flow meter gas*



**Gambar C.3** Pressure gauge dan *flow meter liquid*



**Gambar C.4** Pressure gauge vakum



**Gambar C.5** Alat titrasi chittic

## RIWAYAT HIDUP PENULIS



Nidia Intan Listiyana lahir di Kediri, Jawa Timur pada tanggal 08 Desember 1993. Menempuh pendidikan formal di SDS Pawyatan Daha 2 Kediri tahun 2000-2006, kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMP Negeri 1 Kediri tahun 2006-2009 dan melanjutkan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 2 Kediri tahun 2009-2012. Setelah lulus dari pendidikan SMA, penulis melanjutkan ke tingkat sarjana (S1) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS), Fakultas Teknologi Industri (FTI), Jurusan Teknik Kimia pada tahun 2012 dan bergabung di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa. Penulis mengambil tugas akhir bidang teknologi aplikasi membran di bawah bimbingan Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. dan Siti Nurkhamidah, S.T., MS., P.hD. Pada tahun 2016, penulis melanjutkan pendidikan S2 di Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya dengan bantuan biaya pendidikan dari ITS dan bantuan biaya tesis dari LPDP. Penulis melanjutkan penelitian dalam bidang “Absorpsi dan Desorpsi Gas CO<sub>2</sub> Menggunakan Kontaktor Membran *Hollow Fiber* Membran” di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa di bawah bimbingan Siti Nurkhamidah, S.T., MS., P.hD. dan Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.

## DATA PRIBADI PENULIS

Nama : Nidia Intan Listiyana  
No. HP : 082299040062  
Email : nidiaintan93@gmail.com